

Aus dem Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie

Geschäftsführender Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Steffen Ruchholtz

Medizinische Direktorin: Univ.-Prof. Dr. med. Susanne Fuchs-Winkelmann

des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Humanmedizin

**„Effekte eines 8-wöchigen propriozeptiven
neuromuskulären Faszikulationsdehnprogramms auf
die Länge der Wadenmuskulatur und die
Vorfußbelastung bei semiprofessionellen Fußballern“**

Vorgelegt von

Florentin Nicolas Hohnloser aus Heidelberg

Marburg an der Lahn, 2021

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am:
29.03.2021

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin

Dekanin: Frau Prof. Dr. D. Hilfiger Kleiner

Referent: Frau PD Dr. R. Fuhrmann

1. Korreferent: Herr Prof. Dr. K. Krüger

Gewidmet meiner Großmutter Edith Hohnloser

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellen.....	5
Graphiken.....	5
1. Einleitung.....	7
2. Stand des Wissens.....	10
2.1 Aufbau eines Muskels	10
2.2 Grundlagen der muskulären Dehnung	12
2.3 Techniken zur muskulären Dehnung.....	13
2.4 „Verkürzte Wadenmuskulatur“	14
2.4.1 Definition und klinische Testverfahren	14
2.4.2 Ursachen	17
2.4.3 Folgen	18
2.4.4 Behandlungsansätze.....	19
2.5 Muskuläre Dehnung und deren Auswirkung auf das Ausmaß der Dorsalextension im OSG	21
2.6 Messung plantarer Belastungsprofile mit einer Druckmessplatte (= Pedobarographie) .	22
2.7 Gangzyklus und dessen Abhängigkeit von der Dorsalextension im OSG	24
2.9 Sprungtests und Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus.....	27
3. Fragestellung und Zielsetzung.....	30
4. Material und Methoden.....	31
4.1 Probanden	31
4.2 Studiendesign	31
4.3 Ablauf der Studie.....	32
4.3.1 Eingangsuntersuchung	33
4.3.2 Abschlussuntersuchung.....	33
4.3.3 Zeitbedarf	34
4.4 Anamnese	35
4.5 Klinische Untersuchung.....	35
4.5.1 Beinlänge	35
4.5.2 Beinachse	36
4.5.3 Rückfußachse	36
4.5.4 Beschwiellung Fußsohle	36
4.5.5 ROM im OSG und Silfverskiöld Test	36
4.6 Pedobarographische Untersuchungen.....	39

4.7 Sprungtest	41
4.8 Dehnintervention	44
4.9 Statistik.....	45
5. Ergebnisse	46
5.1 Deskriptive Statistik.....	46
5.2 Prüfung der Annahmen 1-5.....	48
5.2.1 Annahme Nr. 1: Fußballspieler haben eine verkürzte Wadenmuskulatur.	48
5.2.2 Annahme Nr. 2: Ein achtwöchiges PNF Dehnprogramm bewirkt eine Vergrößerung der ROM im OSG bei Fußballspielern.....	51
5.2.3 Annahme Nr.3: Die Vorfußbelastung wird mit zunehmender Dehnung der Wadenmuskulatur reduziert.	53
5.2.4 Annahme Nr. 4: Die Dehnintervention bewirkt eine Verkürzung der Bodenkontaktzeit und Vergrößerung der Sprunghöhe bei reaktiven Sprüngen.	65
5.2.5 Annahme Nr.5: Spieler mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit distal des Kniegelenks in der Vorgeschichte weisen eine überdurchschnittlich geringe ROM im OSG auf.....	68
5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse	69
5.4 Prüfung der Kernfrage.....	70
6. Diskussion/Interpretation	71
6.1 Material und Methoden.....	71
6.1.1 Studienkollektiv.....	71
6.1.2 Silfverskiöld Test.....	72
6.1.3 Pedobarographie.....	75
6.1.4 Dropjump Test.....	79
6.1.5 Dehnintervention	80
6.1.6 Statistische Auswertung.....	82
6.2 Diskussion der Ergebnisse	82
6.2.1 Isolierte Verkürzung des M. gastrocnemius bei Fußballspielern	82
6.2.2 Auswirkungen der Dehnintervention auf das Ausmaß der Beweglichkeit	83
6.2.3 Pedobarographie Daten	84
6.2.4 Dropjump Daten.....	87
6.2.5 Zusammenhang von Verletzungsanfälligkeit und ROM im OSG	88
6.2.6 Ausblick	88
7. Zusammenfassung.....	90
7.1 Deutschsprachige Version.....	90
7.2 Englischsprachige Version	92
8. Literaturverzeichnis.....	94
9. Anhänge	102

9.1 Aufklärungsbogen, Einverständniserklärung und Anamnesebogen	102
9.2 Ethikvotum	107
9.3 Verzeichnis der akademischen Lehrer/innen.....	109
9.4 Danksagung	110

Abkürzungsverzeichnis

PNF	Proprioceptive Muscular Facilitation
M.	Musculus
OSG	oberes Sprunggelenk
USG	unteres Sprunggelenk
ROM	Range of Motion
DS	dynamisches Stretching
SS	statisches Stretching
ACS	Antagonist Contract Stretching
CRS	Contract Relax Stretching
CRAC	Contract Relax Antagonist Contract Stretching
IGC	isolated gastrocnemius contracture
kV	komplexe Verkürzung
PPP	peak plantar pressure
COP	centre of pressure
BKZ/Laufen	Bodenkontaktzeit des Abrollvorgangs
BKZ/Sprung	Bodenkontaktzeit beim Dropjump
DZI = Druck-Zeit-Integral	Druck-Zeit-Integral
HS	heel strike
FF	flat foot
MS	mid stance
HO	heel off
TO	toe off
MSW	midswing
SJ	Squat Jump
CMJ	Countermovement Jump
Drop Jump	DJ
RI	Reaktivitätsindex
DVZ	Dehnungsverkürzungszyklus
SSC	stretch shortening cycle
KG	Kontrollgruppe
IG	Interventionsgruppe
NRS	Numerische Rating Skala
U23	unter 23 Jahre
TB	Trainingsbeteiligung

EU	Eingangsuntersuchung
AU	Abschlussuntersuchung
Bpm	beats per minute

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Beschreibung	Seite
1	Aufbau eines Muskels	11
2	Aufbau und Proteine eines Sarkomers	11
3	Die fünf gebräuchlichsten Dehnmethoden	13
4	Phasen des menschlichen Ganges	25
5	Schematischer Ablauf eines Dropjumps	27, 42
6	Schematischer Ablauf der Studie	33
7	Befestigung des Goniometers am Probanden	37
8	Exemplarische Segmentierung des Fußabdrucks	39
9	Schematischer Ablauf der Studie mit Anzahl der Studienteilnehmer	46
10	Wirkende Kräfte während Silfverskiöld Test	72

Tabellen

Tabelle	Beschreibung	Seite
1	Stichprobencharakteristik	47
2	Anzahl Probanden mit IGC und kV	48
3	Vorliegen von Beschwielen im Vorfußbereich	61
4	Dauer BKZ/Laufen des gesamten Abrollvorgangs	84

Graphiken

Graphik	Beschreibung	Seite
1	Anteil Probanden mit IGC und kV	49
2	ROM Extensions/Flexionsstellung	51
3	PPP Hallux	52
4	PPP Vorfuß	53
5	PPP Ferse	54
6	proz. Anteil Hallux an gesamter BKZ/Laufen	55
7	proz. Anteil Vorfuß an gesamter BKZ/Laufen	56
8	proz. Anteil Ferse an gesamter BKZ/Laufen	57
9	DZI Hallux	58
10	DZI Vorfuß	59

11	DZI Ferse	60
12	Anteil an Probanden mit Beschwiellung	61
13	Schmerzangaben	63
14	Sprunghöhe DJ Test	64
15	BKZ/Sprung DJ Test	65
16	RI Werte DJ Test	66
17	ROM im OSG in Abhängigkeit von der Verletzungsanfälligkeit	67

1. Einleitung

Ein homogenes, beschwerdefreies und leistungsstarkes Zusammenspiel der Muskulatur und aller daran beteiligten Strukturen ist sowohl für sportliche Aktivitäten als auch für Alltagsaktivitäten bedeutsam. Neben muskulärem Training wird gezielten Dehnprogrammen eine wichtige Rolle für den Erhalt oder die Wiedererlangung eines gut funktionierenden muskuloskelettalen Systems zugeschrieben. Verletzungen, Dysbalancen und Verkürzungen eines Muskels können in der Regel nicht isoliert betrachtet werden, sondern haben immer auch Auswirkungen auf angrenzende Strukturen. Der in der vorliegenden Studie beleuchtete Musculus (M.) triceps surae bildet hier keine Ausnahme. Insbesondere eine Verkürzung der Muskulatur wirkt sich direkt auf die Beweglichkeit des Sprunggelenks, das Gangprofil, die Abrollung des Fußes und folglich auf das Belastungsprofil der Fußsohle aus.

Der M. triceps surae besteht aus drei Anteilen, die sich in der Achillessehne vereinigen: dem zweiköpfigen M. gastrocnemius und dem M. soleus. Hiervon ist der zweiköpfige M. gastrocnemius der stärkere und hat zudem einen biartikulären Verlauf (teilweise in der Literatur auch als dreigelenkig geführt, wenn das Sprunggelenk in oberes Sprunggelenk (OSG) und unteres Sprunggelenk (USG) aufgeteilt wird), da er sowohl das Kniegelenk als auch das Sprunggelenk überspannt. Der Ursprung seines Caput mediale befindet sich am Epicondylus medialis femoris, der des Caput laterale am Epicondylus lateralis femoris. Der tief liegende M. soleus hat seinen Ursprung an der dorsalen Fläche der Fibula (Facies posterior fibulae) und der Tibia (Linea musculi solei) sowie am Arcus tendineus musculi solei, einer sehningen Verbindung von Fibula und Tibia. Die beiden Muskelköpfe vereinigen sich distal in der Achillessehne, die breitflächig am Tuber calcanei ansetzt. Zusätzlich verlaufen die Fasern von proximal nach distal in mediolateraler Richtung. Bedingt durch diesen rotatorischen Verlauf der Fasern ergibt sich eine Verwindung der Sehne, die van Gils, Steed et al. in „Torsion of the human achilles tendon“ mit durchschnittlich $8,12^\circ$ beziffern (van Gils, Steed et al. 1996). M. gastrocnemius, M. soleus und Achillessehne befinden sich im oberflächlichen dorsalen Kompartiment des Unterschenkels. Die Kontraktion des M. triceps surae bewirkt eine Plantarflexion und Supination im oberen Sprunggelenk, da der Ansatz der Achillessehne medial der Bewegungsachse des unteren Sprunggelenks liegt. Der M. gastrocnemius ist zusätzlich an der Flexion des Kniegelenks beteiligt.

Bedingt durch eine unterschiedliche Beanspruchung der Beuge- und Streckmuskulatur, bevorzugtem Training der ventralen Oberschenkelmuskulatur, sitzende Tätigkeiten und die Biomechanik des Gastrocnemius kommt es häufig zu einer Verkürzung der Wadenmuskulatur. Die funktionell determinierten Gesundheitsstörungen, die aus einer Verkürzung des Gastrocnemius /Soleus-Komplexes resultieren, sind weitreichend in der Literatur beschrieben (DiGiovanni, Kuo et al. 2002, Bowers and Castro 2007, You, Lee et al. 2009, Espinosa, Brodsky et al. 2010, Patel and DiGiovanni 2011, Singh 2013, Barouk 2014, Barouk 2014, Cazeau and Stiglitz 2014). Die eingeschränkte Dorsalextension des Fußes und das dadurch reduzierte Bewegungsausmaß (= „range of motion“ (ROM)) führen zu Schmerzen und degenerativen Veränderungen im Bereich der Achillessehne (Achillodynie), am Achillessehnenansatz (Ansatzentzündung), posteriorer Fersensporn, Plantarfasziitis) und dem Vorfuß (Metatarsalgie). Das gleichzeitige Auftreten von einer Verkürzung des Gastrocnemius/Soleus Komplexes und Diabetes wird als Hinweis für die Entstehung von diabetischen Vorfußulcerationen gesehen (Armstrong, Stacpoole-Shea et al. 1999, Nishimoto, Attinger et al. 2003, Greenhagen, Johnson et al. 2012). Beim Laufen führt die Verkürzung neben weiteren veränderten Parametern vor allem zu einer vermehrten Vorfußbelastung (You, Lee et al. 2009, Chimera, Castro et al. 2012). Dies wird als entscheidender zugrunde liegender Pathomechanismus für die oben beschriebenen Krankheitsbilder gesehen.

Wenn sich die funktionellen Beschwerden auf eine Verkürzung der Wadenmuskulatur zurückführen lassen, besteht die kausal orientierte Therapie in einer Verlängerung der Muskel-Sehnen-Strecke. Hierzu sind unterschiedliche operative Verfahren (Techniken nach Vulpius, Strayer, Baumann oder endoskopische Verlängerung) und deren Outcome bekannt (Wren, Do et al. 2004, Tylkowski, Horan et al. 2009, Chimera, Castro et al. 2010, Barske, DiGiovanni et al. 2012, Abbasian 2013, Abdulmassih, Phisitkul et al. 2013, Barske, DiGiovanni et al. 2013, Anderson, Bohay et al. 2014, Phisitkul, Rungprai et al. 2014, Morales-Muñoz, De Los Santos Real et al. 2016). Insbesondere die Studien von Nishimoto et al. (Nishimoto, Attinger et al. 2003) und Barske et al. (Barske, DiGiovanni et al. 2012) zeigen durch Linderung der Symptome bei Verlängerung der Wadenmuskulatur, den direkten Zusammenhang zwischen verkürzter Wadenmuskulatur, eingeschränkter Dorsalextension und erhöhter Vorfußbelastung.

Die konservative Herangehensweise einer Verlängerung der Wadenmuskulatur in Form von Dehnprogrammen und deren Auswirkungen auf die Vorfußbelastung ist jedoch nur sehr spärlich untersucht. Es gibt mehrere Studien, die die Auswirkungen von

Dehnprogrammen auf das Ausmaß der Dorsalextension untersuchen (Etnyre and Abraham 1986, Grady and Saxena 1991, Radford, Burns et al. 2006, Johnson, Bradley et al. 2007, Nakamura, Ikezoe et al. 2016). Die Ergebnisse von Radford et al. (Radford, Burns et al. 2006), Johnson et al. (Johnson, Bradley et al. 2007), Grady and Saxena (Grady and Saxena 1991), Nakamura et al. (Nakamura, Ikezoe et al. 2016) und Etnyre and Abraham (Etnyre and Abraham 1986) belegen, dass durch verschiedene Dehninterventionen eine Verbesserung der passiven Dorsalextension im OSG erzielt werden kann. Die klinische Relevanz des größeren ROM im OSG wird in den genannten Studien jedoch nicht untersucht.

Mit der Thematik der klinischen Relevanz von Dehnprogrammen befassen sich zwei andere Studien, die jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Macklin et al. (Macklin, Healy et al. 2012) kommen in ihrer Studie, bei der sie die Auswirkungen eines Dehnprogramms auf das ROM im OSG und das dynamische plantare Belastungsprofil untersuchen, zu dem Ergebnis, dass sich das ROM im OSG durch Dehnung zwar vergrößern lässt, aber sich beim Abrollen des Fußes die Fersenkontaktzeit verkürzt und die Spitzendrücke im Vorfußbereich erhöhen (Macklin, Healy et al. 2012). Diese Ergebnisse widersprechen dem allgemeinen pathoanatomischen Verständnis und den klinischen Erfahrungswerten einer zunehmenden Länge der Wadenmuskulatur. Die aktuellen Ergebnisse aus dem Jahre 2019 von Martinez-Jimenez et al. belegen im Gegensatz dazu die These, dass durch Dehnung der Wadenmuskulatur eine Reduktion der Vorfußspitzendrücke bewirkt werden kann (Martínez-Jiménez, Losa-Iglesias et al. 2019). Allerdings basiert diese Studie auf einer für das Belastungsprofil beim Gehen nur bedingt aussagekräftigen statischen Fußdruckmessung.

Die beschriebene Studienlage deutet darauf hin, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um die Wirksamkeit eines konservativen Behandlungsansatzes und ihre klinischen Auswirkungen zu untersuchen. Insbesondere die Verknüpfung von Veränderungen der ROM und der Belastungsprofile mit objektiven funktionellen Parametern, wie Sprunghöhe und Bodenkontaktzeit (= BKZ/Sprung) bei leistungsorientierten Probanden ist bisher nur unzureichend beleuchtet worden. Unter der Annahme, dass eine Dehnung der Wadenmuskulatur zu einer vergrößerten ROM führt, ist es das Ziel der vorliegenden Studie, herauszufinden, ob durch Dehnprogramme eine Reduktion der Vorfußbelastung zu bewirken ist und ob sich dies auf die Leistungsfähigkeit auswirkt.

Hinsichtlich der Auswahl der Dehntechnik gilt es verschiedene Aspekte zu beachten, da den einzelnen Dehntechniken unterschiedliche Vor- und Nachteile zugeschrieben werden. Für die vorliegende Studie wird ein PNF- (propriozeptive neuromuskuläre Faszikulation) Dehnprogramm gewählt, da dieser Beübung die größte Auswirkung auf die ROM attestiert wird (Sady, Wortman et al. 1982, Etnyre and Abraham 1986, Funk, Swank et al. 2003, Hindle, Whitcomb et al. 2012). Die genaue Erläuterung dieser Technik sowie die weiteren Beweggründe für die Auswahl der PNF-Methode werden unter dem Punkt „Stand des Wissens“ beschrieben. Als Studienpopulation wurden Fußballspieler gewählt, da bei ihnen aufgrund der ungleichmäßigen funktionellen Beanspruchung der Beinmuskulatur in der Regel eine Verkürzung der Wadenmuskulatur, die mit einer krankheitswertig gesteigerten Vorfußbelastung einhergeht, vorliegt. Der Begriff semiprofessionell impliziert, dass die Probanden ihren Lebensunterhalt sowohl über ihre fußballerische Tätigkeit als auch mit anderen Berufen bestreiten.

2. Stand des Wissens

2.1 Aufbau eines Muskels

Die konservativen Behandlungsmöglichkeiten bei Verkürzung der Wadenmuskulatur beinhalten Übungen, die eine Dehnung der Muskel-Sehnen-Einheit bewirken sollen. Hierfür ist es zunächst einmal notwendig den Aufbau eines Muskels und die an der Dehnung beteiligten Strukturen zu beleuchten.

Der Mensch besitzt drei verschiedene Arten von Muskulatur: Herzmuskulatur, glatte Muskulatur und quergestreifte Muskulatur (auch Skelettmuskulatur). Von den drei Arten ist für diese Arbeit nur die willkürlich steuerbare quergestreifte Skelettmuskulatur von Bedeutung. Die Herzmuskulatur und glatte Muskulatur sind nicht willkürlich kontrahierbar. Jeder Skelettmuskel besitzt mindestens einen Ursprung und einen Ansatz. Im Bereich des tendomuskulären Übergangs geht das Gewebe des Muskels kontinuierlich in das Gewebe der Sehne über. Die Sehne sorgt letztlich auch für die Fixierung an knöchernen Strukturen. Sehnen bestehen je nach Lokalisation zu großen Teilen aus kollagenen Fasern mit einem geringen Anteil an elastischen Fasern, wodurch sich auch die geringe Dehnbarkeit von ca. 5% erklären lässt (Lindel 2006). Ein

menschlicher Skelettmuskel gliedert sich in mehrere Muskelfaserbündel, die wiederum aus einzelnen Muskelfasern bestehen. Der gesamte Muskel ist außen von einer Faszie umhüllt. Unmittelbar unter der Muskelfaszie stellt eine bindegewebige Schicht, das Epimysium, die Verbindung zum Muskel her. Vom Epimysium ziehen bindegewebige Septen in das Innere des Muskels und umgeben sowohl einzelne Muskelfasern (=Primärbündel) als auch Muskelfaserbündel (=Sekundärbündel). Die ein Bündel umfassende Bindegewebsstruktur wird als Perimysium, die, das einzelne Fasern umgebende Gewebe als Endomysium bezeichnet (Abb. 1). Eine einzelne Muskelfaser setzt sich wiederum zusammen aus vielen Tausend Myofibrillen. Eine Myofibrille besteht aus der Aneinanderreihung von Sarkomeren, die die kleinsten kontraktile Einheiten des Muskels darstellen. Bedingt durch die regelmäßig wechselnde Anordnung dünnerer Aktin- (ca. 7 nm Durchmesser) und dickerer Myosinfilamente (ca. 15 nm Durchmesser) innerhalb der Sarkomere stellt sich der Skelettmuskel lichtmikroskopisch quergestreift dar. Zwei benachbarte Sarkomere werden durch sogenannte Z-Scheiben voneinander getrennt. Die Aktinfilamente mitsamt ihrer Begleitproteine (Tropomyosin und Troponin) sind an den Z-Scheiben miteinander verbunden. Die Myosinfilamente werden in der M-Linie durch das Protein Myosin miteinander vernetzt. Die Elastizität wird gewährleistet durch das Protein Titin, welches die Myosinfilamente mit der Z-Scheibe verbindet (Abb.2). Bei einer Muskelkontraktion wandern die Myosinköpfe entsprechend der Gleitfilamenttheorie von Huxley und Henson an den Aktinfilamenten entlang in Richtung der Z-Scheiben. (Aumüller, Aust et al. 2007)

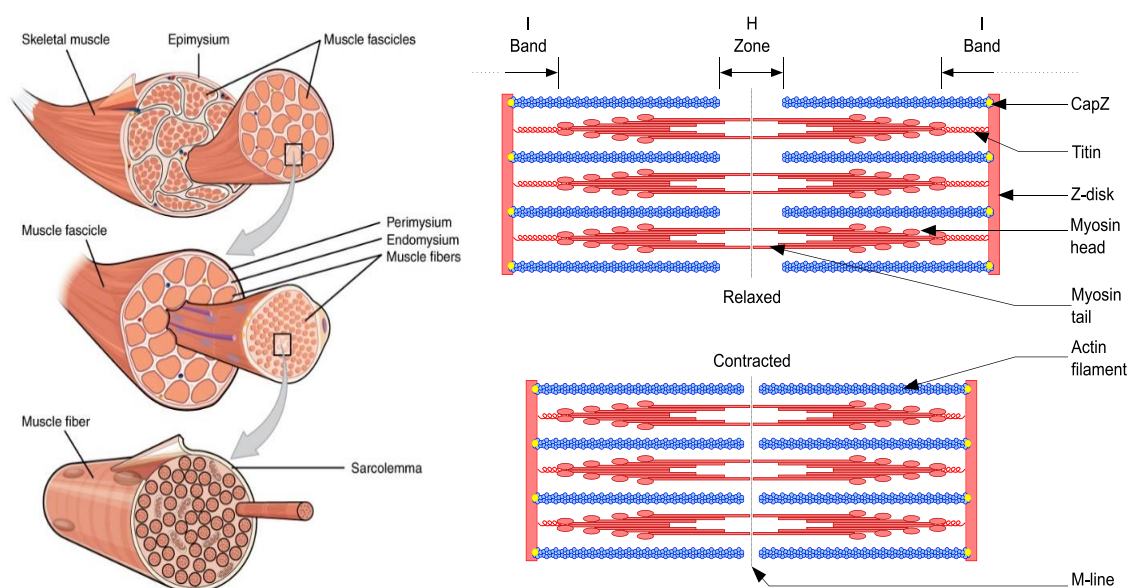


Abb.1:Aufbau eines Muskels (OpenStax 2016), freie Veröffentlichung unter der Creative Commons Attribution 4.0 License

Abb.2: Aufbau eines Sarkomers (Richfield 2014), freie Veröffentlichung unter der Creative Commons Attribution ShareAlike License

2.2 Grundlagen der muskulären Dehnung

Wird ein Muskel aus der Neutral-Null-Stellung durch eine äußere Kraft verlängert, gibt der Muskel nach und wird gedehnt. Der dehnenden Kraft setzt der Muskel einen exponentiell ansteigenden passiven Widerstand entgegen. Dieser Widerstand wird als Dehnungsspannung bezeichnet. Der Muskel kann solange gedehnt werden bis die Dehnungsspannung der äußeren dehnenden Wirkung entspricht und keine weitere Vergrößerung des Bewegungsausmaßes mehr möglich ist (Wiemann, Klee et al. 1999). In der Praxis wird die endgradige Dehnung häufig nicht erreicht, da das zunehmende Spannungsgefühl, auch Dehnungsschmerz genannt, das Bewegungsausmaß limitiert bevor die maximale Dehnfähigkeit des Muskels erreicht ist. Ebenso kann das Ausmaß der Dehnungsfähigkeit durch die Anatomie der Gelenke (= Gelenkigkeit) limitiert werden. Die beschriebene Eigenschaft des Muskels gedehnt zu werden, wird als Muskeldehnungsfähigkeit bezeichnet. Diese Muskeldehnungsfähigkeit ist durch verschiedene Dehntechniken erweiterbar. Das Zusammenspiel aus Gelenkbeweglichkeit und Muskeldehnungsfähigkeit bestimmt die ROM (Wiemann, Klee et al. 1999, Klee and Wiemann 2004, Wiemann Zugriff 01/19). Bis in die 80er Jahre ging man davon aus, dass die elastischen Rückstellkräfte eines Muskels bedingt seien durch die, den Muskel umhüllenden Faserhüllen. Erst als Maruyama et al. im Jahr 1977 (Maruyama, Matsubara et al. 1977) das elastische in der I Bande gelegene Protein Titin entdeckten und Magid und Law et al. durch Entfernung der Muskelfaserhülle nachwiesen, dass die Rückstellkräfte eines Muskels auf Titin (auch Connectin) zurückzuführen sind (Magid and Law 1985), konnte die muskuläre Elastizität hinreichend erklärt werden. Titinfilamente sind demnach hauptverantwortlich für die Dehnungsspannung des Muskels und können nach Klee als „Quelle der Muskelelastizität“ bezeichnet werden (Klee and Wiemann 2004). Die Hauptfunktion von Titin besteht in der Zentrierung der Myosinfilamente zwischen den Z Scheiben und der Entdehnung des Sarkomers nach vorheriger Dehnung. Die sich kurzfristig und insbesondere langfristig einstellende Vergrößerung des Bewegungsausmaßes lässt sich jedoch nicht allein durch die Eigenschaften des Proteins Titin erklären. In der Literatur besteht zwar ein zweifelsfreier Konsens, dass durch unterschiedliche Dehnvarianten die ROM verbessert werden kann. Hinsichtlich dem diesem Effekt zugrunde liegenden Mechanismus existieren jedoch sehr unterschiedliche Meinungen (Behm, Blazeovich et al. 2015). Als mögliche Erklärungen werden Gewöhnungseffekte an höhere Spannung, steigende Schmerztoleranz, bisher unbekannte Strukturen/Funktionen und eine Verlängerung der

Muskulatur genannt (Weppler and Magnusson 2010). Nicht zu vergessen ist in diesem Zusammenhang, dass auch die Gelenkbeweglichkeit selbst durch Dehnung der umgebenden Weichteile (z.B. Gelenkkapsel) verbessert werden kann.

2.3 Techniken zur muskulären Dehnung

Es muss zwischen verschiedenen Dehnmethoden unterschieden werden. Klee unterscheidet fünf populäre Dehnmethoden: dynamisches Stretching (DS), statisches Stretching (SS) und drei Methoden der propriozeptiven neuromuskulären Fazilitation (PNF) (Antagonist Contract Stretching (ACS), Contract Relax Stretching (CRS) und CR-AC Stretching)(Klee 2003).

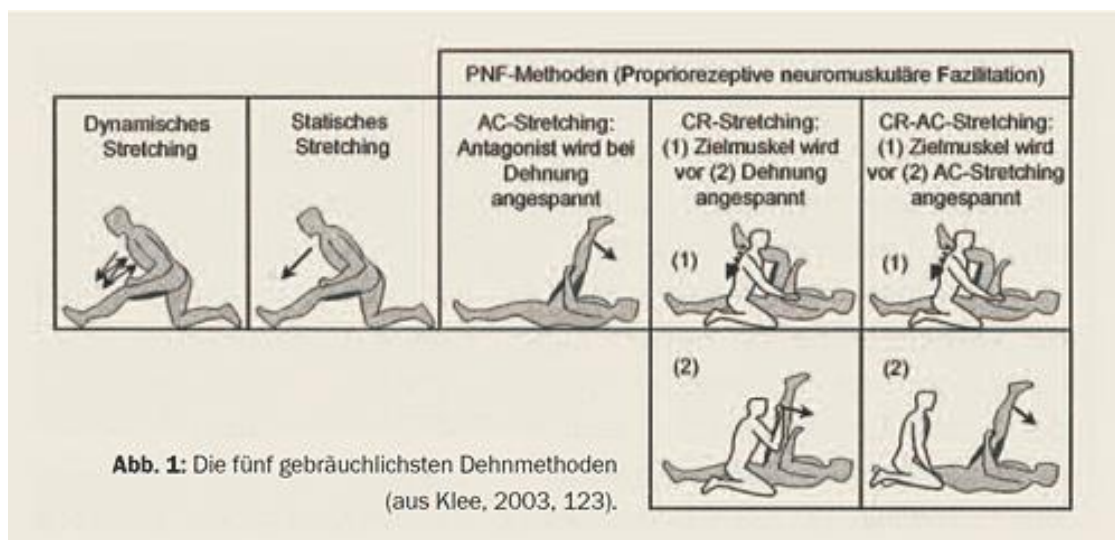


Abb.3: Die fünf gebräuchlichsten muskulären Dehnmethoden(Klee 2003), mit Genehmigung von Hofmann-Verlag GmbH & Co. KG

(1) Das dynamische Stretching (DS) zeichnet sich dadurch aus, dass die Dehnposition mit einer dynamischen Bewegung eingenommen wird, um anschließend sofort wieder verlassen zu werden. Dieser Ablauf wird im Wechsel fortgeführt und kann dann folglich auch als intermittierendes Dehnen bezeichnet werden. Wenn die Bewegungen federnd oder wippend ausgeführt werden, spricht man von rhythmischem, schwingendem oder ballistischem Dehnen.

(2) Für das statische Stretching (SS) wird die Dehnposition mit einer kontrollierten Bewegung eingenommen und anschließend längere Zeit (Sekunden bis Minuten) unbeweglich gehalten.

(3) Beim AC-Stretching (Antagonist Contract) wird während der Dehnung eine isometrische Kontraktion des Antagonisten durchgeführt.

(4) Beim CR Stretching (Contract Relax) wird der Zielmuskel vor Durchführung der Dehnung kontrahiert.

(5) Die CR-AC Stretching Technik verbindet die Methoden (3) und (4) miteinander. Diese Technik wird häufig partnerassistent durchgeführt, ist aber auch wie in der vorliegenden Arbeit praktiziert, ohne einen Partner durchführbar.

Hindle et al. beschreiben in ihrem Review-Beitrag vier Mechanismen, um die Wirksamkeit der PNF Methode zu erklären (Hindle, Whitcomb et al. 2012). Beim AC Stretching soll durch die Kontraktion des Antagonisten über Renshaw Zellen eine reziproke Inhibition im Zielmuskel erzielt werden. Mit der CR Stretching Technik soll eine Hemmung des Golgi Sehnenapparates auf den Dehnungsreflex erzielt werden. Außerdem werden die Gate-Control Theorie und Stress Relaxation als mögliche Erklärungsansätze genannt. Studien, die die Haltbarkeit dieser in der Literatur beschriebenen neurophysiologischen Grundlagen belegen, existieren bisher jedoch nicht.

Hinsichtlich der Vergrößerung der ROM liegt eine Vielzahl an Studien vor, die die Überlegenheit der PNF-Methode im Vergleich zu anderen Dehnmethoden belegen (Sady, Wortman et al. 1982, Wallin, Ekblom et al. 1985, Etnyre and Abraham 1986, Magnusson, Simonsen et al. 1996, Ferber, Osternig et al. 2002, Funk, Swank et al. 2003).

2.4 „Verkürzte Wadenmuskulatur“

2.4.1 Definition und klinische Testverfahren

Zunächst einmal ist es von Bedeutung die unterschiedlichen Begriffe rund um das Thema verkürzte Wadenmuskulatur zu klären. Im Zuge der Literaturrecherche treten Begriffe auf, wie Achillessehnenverkürzung, kombinierte Verkürzung von M. gastrocnemius und M. soleus und isolierte M. gastrocnemius-Verkürzung (auch

Kontraktur, auch „isolated gastrocnemius contracture“ = IGC). Da sich der M. gastrocnemius und M. soleus in der Achillessehne vereinigen sind die Begriffe Achillessehnenverkürzung und kombinierter Verkürzung des Gastrocnemius/Soleus - Komplexes nicht voneinander zu unterscheiden. Sie beschreiben eine Verkürzung, die weitestgehend unabhängig vom Beugungsgrad des Kniegelenks besteht. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass entsprechend der o.g. anatomischen Ausführungen zum morphologischen Aufbau der Achillessehne eine echte Verkürzung der Achillessehne nur nach vorausgegangenen Operationen und Verletzungen an der Sehne selbst denkbar ist, weshalb der Begriff der Achillessehnenverkürzung im Zusammenhang der vorliegenden Studie vermieden werden sollte. Abzugrenzen davon ist die isolierte M. gastrocnemius-Verkürzung. Die IGC ist dadurch gekennzeichnet, dass bei gestrecktem Kniegelenk ein verringertes Bewegungsausmaß im OSG auftritt, welches sich durch Flexion im Kniegelenk wieder normalisiert. Obwohl bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts Silfverskiöld (Silfverskiöld 1924) ¹ sowie Vulpius und Stoffel (Vulpius and Stoffel 1913) erstmalig die isolierte M. gastrocnemius-Verkürzung beschreiben, wurde lange Zeit nur die ausgeprägte Verkürzung mit offensichtlicher Spitzfußstellung beachtet. Die Auswirkungen von klinisch weniger deutlichen IGC wurde lange Zeit vernachlässigt. Diesem Umstand schreiben DiGiovanni et al. in „Isolated gastrocnemius tightness“ (DiGiovanni, Kuo et al. 2002) auch die nach wie vor uneinheitliche Definition einer IGC zu.

Zentrales Messinstrument einer IGC stellt die klinische Untersuchung mit Hilfe des Silfverskiöld Tests dar. Dieser Test basiert auf dem zweigelenkigen Verlauf des M. gastrocnemius und dessen Entspannung durch Flexion im Kniegelenk. Während der Namensgeber des Tests, Nils Silfverskiöld, das Ausmaß einer Verkürzung noch über die für eine Dorsalextension aufzuwendende Kraft maß, wird der Test heute über das passive Bewegungsausmaß bemessen (Singh 2013). Der Test beurteilt das Ausmaß der passiven Dorsalextension im OSG bei gestrecktem und gebeugtem Kniegelenk. Im klinischen Alltag wird der Test häufig nicht mit Gradzahlen quantifiziert, sondern nur mit „positiv“ oder „negativ“ angegeben, je nachdem ob sich die eingeschränkte Dorsalextension durch Flexion im Kniegelenk ausgleichen lässt oder nicht. Um eine bestimmte Gradzahl festsetzen zu können, ab der man definitionsgemäß von einer Verkürzung des M. gastrocnemius spricht, müsste jedoch zunächst der Test bezogen auf

¹ In der Literatur existieren unterschiedliche Namensschreibweisen. In der vorliegenden Studie wird ausschließlich die Schreibweise „Silfverskiöld“ verwendet, die von Singh et al. als die einzig richtige hervorgehoben wird.

die Position des Kniegelenks genormt werden. Der bei Studien im Kniegelenk angewandte Flexionsgrad für den Test reicht jedoch von 30-90 Grad, wodurch eine Vergleichbarkeit der Werte laut DiGiovanni et al. (DiGiovanni, Kuo et al. 2002) deutlich erschwert wird. Baumbach et al. (Baumbach, Brumann et al. 2014) hingegen kommen in ihrer 2014 veröffentlichten Studie zu dem Ergebnis, dass bereits ab 20 Grad Kniebeugung ein verkürzter Gastrocnemius nicht mehr hemmend auf die Dorsalextension wirkt, womit die Argumentation von DiGiovanni et al., dass die große Streubreite der Werte durch unterschiedliche Flexionsgrade zu erklären sei, hinfällig wäre. Die Erkenntnisse von Baumbach et al. deuten darauf hin, dass die Uneinigkeit vor allem bedingt ist durch die fehlende Normierung, der auf die Fußsohle applizierten Kraft. Ekstrand et al. und Elveru et al. kommen in ihren Studien zu dem Ergebnis, dass bei der Untersuchung der Dorsalextension mit einem Goniometer zwar eine gute Intrarater Reliabilität gewährleistet ist, diese aber nicht im gleichen Maß für die Interrater Reliabilität gilt (Ekstrand, Wiktorsson et al. 1982, Elveru, Rothstein et al. 1988). Auch Martin et al. kommen in einem aktuelleren Review zu dem gleichen Ergebnis (Martin and McPoil 2005). Wenn man die Studie von Baumbach et al. (Baumbach, Brumann et al. 2014) beachtet ist die große Variabilität der Werte auf die schlechte Interrater Reliabilität zurückzuführen. Diese entsteht vermutlich dadurch, dass ein Großteil der Studien nicht mit einem Equinometer durchgeführt wird, sondern die Kraft manuell appliziert wird. Auch die Erkenntnis von DiGiovanni et al. (DiGiovanni, Kuo et al. 2002), dass die Gradzahlen ab wann Autoren von einer Verkürzung sprechen von 0 bis 25° reichen, zeigen die Ungenauigkeit der Bewertung der Untersuchungstechnik. Auch der Startpunkt der Messung ist nicht einheitlich. Die Winkelmessung kann in Neutralstellung begonnen werden (90° Winkel zwischen Fußsohle und Unterschenkel) oder am L0 Punkt, den Barouk et al. (Barouk and Barouk 2014) als den Punkt definiert, ab wann ein Dehnwiderstand besteht.

DiGiovanni et al. (DiGiovanni, Kuo et al. 2002) schlagen auf Basis der eigenen Daten zwei Grenzwerte für eine IGC vor. Die weniger strenge Variante definiert Werte der Dorsalextension von $\leq 5^\circ$ bei gestrecktem Kniegelenk als IGC. Die strengere Definition spricht schon bei Werten $\leq 10^\circ$ von einer IGC. Eine kombinierte muskuläre Verkürzung liegt ihnen zufolge bei Gradzahlen von $\leq 10^\circ$ bei gebeugtem Kniegelenk vor. Die genannten Zahlen basieren auf Daten, die durch Messungen mit einem Equinometer erhoben wurden. Die applizierte Kraft betrug 10 Nm. Die erzielten Gradzahlen ergaben sich durch die Differenz der Neutralstellung (90° zwischen Fußsohle und Unterschenkel) und der Endstellung. Untersuchungen bei denen die

Neutralstellung nicht erreicht wird, werden über die Differenz zum Neutralwert mit negativem Vorzeichen angegeben.

Barouk et al. (Barouk and Barouk 2014) definieren in „Clinical Diagnosis of Gastrocnemius Tightness“ eine IGC auf Basis eines manuellen Testverfahrens mit moderateren Werten. Der Fuß wird nicht anfänglich in eine 90° Position gebracht und ab dieser Stellung die Differenz zwischen Ausgangsstellung und Endstellung gemessen, wenn eine bestimmte Kraft appliziert wird. Ausgangsstellung ist der entspannte Fuß. Bei manueller Applikation von ca. 2 kg wird der Beginn der für den Untersucher spürbaren Dehnungsspannung als L0 definiert und die Gradzahl notiert. Wenn dieser L0 Wert in Extensionsstellung $\leq 0^\circ$ ist und die Differenz zur Flexionsstellung mindestens 13° beträgt, liegt den Autoren zufolge eine IGC vor.

Aus den genannten Gründen ist eine wissenschaftlich exakte und eindeutige Definition bzw. Gradzahl, ab wann von einer verkürzten Wadenmuskulatur gesprochen werden kann leider nicht möglich. Gemessene Gradzahlen lassen sich nur dann aussagekräftig vergleichen, wenn sie mit Werten verglichen werden, die den gleichen Versuchsaufbau aufweisen.

2.4.2 Ursachen

Die deutlichste und offensichtlichste Verkürzung der Wadenmuskulatur ist bei Kindern zu beobachten, die unter einem isolierten oder kombinierten Spitzfuß leiden. Bei Patienten mit infantiler Zerebralparese liegt zu Beginn eine dynamische Verkürzung der Wadenmuskulatur vor, die unbehandelt in eine strukturelle Verkürzung übergeht. Als Pathomechanismus des spastischen Spitzfußes wird die Persistenz von Streckmustern mit resultierender Überaktivität der Wadenmuskulatur genannt. Zudem spielen bei Kindern mit infantiler Zerebralparese ein zurückbleibendes Längenwachstum der Muskulatur aufgrund von ausbleibenden Dehnungsreizen eine Rolle (Westhoff, Weimann-Stahlschmidt et al. 2011). Abgesehen von den genannten neurologischen Grunderkrankungen, sind die Ursachen einer funktionellen Verkürzung der Wadenmuskulatur nicht eindeutig geklärt. Es gibt jedoch Erklärungsversuche: ein ungünstiger Einfluss auf die Länge des M. gastrocnemius wird dem Schuhwerk (Absatzhöhe) zugeschrieben (Zöllner, Pok et al. 2015). Eine zentrale Rolle bei der Klärung der Frage, wodurch die IGC bei sonst gesunden Patienten zustande kommt und welche Folgen sie hat, spielt in der Studie von Mehlhorn et al die Biomechanik des M.

gastrocnemius (Mehlhorn, Legrand et al. 2017). Durch seinen biartikulären Verlauf und die Anforderungen im Alltag resultiert nach Mehlhorn et al ein Übergewicht von Anspannung im Vergleich zur Dehnung der Muskelfasern (Mehlhorn, Legrand et al. 2017). Als begünstigend führen die Autoren verschiedene Situationen an: Beim Gehen fungiert der M. gastrocnemius als Kniebeuger, beim Stehen als Stabilisator und wird folglich angespannt. Im Sitzen sind die Fasern durch die Flexion im Kniegelenk entspannt und können sich verkürzen. Auch in liegender Position kommt es zu einer Plantarflexion des Fußes im OSG und somit zu einer Entspannung der Wadenmuskulatur (Bowers and Castro 2007). Außerdem soll auch das muskuläre Ungleichgewicht zwischen Beuge- und Streckmuskulatur einen negativen Einfluss auf die Länge der Wadenmuskulatur haben.

Das Vorliegen von reduzierten ROM von Gelenken der unteren Extremität bei Fußballspielern wurde bereits untersucht (Witvrouw, Danneels et al. 2003). Die genannte Studie und die spezifischen Anforderungen der Sportart deuten darauf hin, dass Fußballer in besonderem Maß von einer Verkürzung der Wadenmuskulatur betroffen sind und sich daher gut für die Fragestellung der vorliegenden Studie eignen.

2.4.3 Folgen

Die Folgen einer verkürzten Wadenmuskulatur können in Kompensationsmechanismen und krankhafte Folgen unterteilt werden. Die Kompensationsmechanismen werden von Mehlhorn et al. in proximale und distale Formen unterteilt (Mehlhorn, Legrand et al. 2017). Die proximalen Mechanismen zielen darauf ab, den veränderten Körperschwerpunkt durch Flexion in Knie-/Hüftgelenk und lumbaler Lordosierung auszugleichen (Mehlhorn, Legrand et al. 2017). Bei den distalen Mechanismen ist das frühe Abheben der Ferse und die dadurch bedingte verkürzte Kontaktzeit während des Gangs zu nennen. Als Folge des früheren Anhebens der Ferse steigen die Spitzendrücke im Vorfußbereich an. Der Zusammenhang einer verkürzten Wadenmuskulatur und dem daraus resultierenden Bild eines Spitzfußes, der durch vermehrten Zug der Wadenmuskulatur auf den Calcaneus entsteht, sind hinreichend bekannt und beschrieben (DiGiovanni, Kuo et al. 2002, Bowers and Castro 2007, You, Lee et al. 2009, Espinosa, Brodsky et al. 2010, Patel and DiGiovanni 2011, Singh 2013, Barouk 2014, Barouk 2014, Cazeau and Stiglitz 2014). Dass die erhöhten Spitzendrücke Ursache verschiedener krankhafter Veränderungen im Vorfußbereich sind, wurde lange

Zeit vernachlässigt. Obwohl der Zusammenhang zwischen einer verkürzten Wadenmuskulatur und den daraus resultierenden Gesundheitsstörungen schon lange bekannt gewesen zu sein schien, untersuchten DiGiovani et al. im Jahr 2002 das erste Mal eine Gruppe gesunder Probanden, ohne neurologische Defizite, bei denen eine Metatarsalgie oder eine andere Vorfußpathologie diagnostiziert worden war, auf das Vorliegen einer muskulär determinierten Dorsalextensionseinschränkung im oberen Sprunggelenk. Mit dieser kontrollierten Studie wiesen sie auf den Zusammenhang zwischen einer verkürzten Wadenmuskulatur und den daraus resultierenden Gesundheitsstörungen hin. Außerdem hoben sie mit dieser Studie die Wichtigkeit der Unterscheidung zwischen einer isolierten Verkürzung des M. gastrocnemius und einer komplexen Verkürzung des M. gastrocnemius und des M. soleus hervor (DiGiovanni, Kuo et al. 2002, Patel and DiGiovanni 2011) .

Somit rückte die verkürzte Wadenmuskulatur zunehmend als Ursache krankhafter Veränderungen abseits des Spitzfußes in den Fokus. An krankhaften Veränderungen zu nennen sind funktionelle (Fasziitis plantaris, Metatarsalgie mit Schwielen / Ulcerationen) und strukturelle Veränderungen (Achillodynien, Ansatzentzündungen der Achillessehne, posteriorer Fersensporn, Hallux valgus und Hammerzehen deformität) die auf eine verkürzte Wadenmuskulatur zurückzuführen sind (Maskill, Bohay et al. 2010, Barske, DiGiovanni et al. 2012, Abbasian 2013, Anderson, Bohay et al. 2014, Phisitkul, Rungprai et al. 2014, Morales-Muñoz, De Los Santos Real et al. 2016, Rong, Li et al. 2016). Den direkten Zusammenhang zwischen einer verkürzten Wadenmuskulatur und dem erhöhten Druck im Vorfußbereich belegt weiterhin eine Studie, die sich mit der Thematik unter einem anderen Gesichtspunkt befasste. Armstrong et al. verlängerten bei Patienten, die im Zuge einer Diabetes-Erkrankung kurz vor der Entwicklung einer Ulzeration im Vorfußbereich waren, die Achillessehne präventiv und erzielten dadurch eine deutliche Reduktion der Vorfußspitzendrücke (Armstrong, Stacpoole-Shea et al. 1999).

2.4.4 Behandlungsansätze

Die Behandlungsmöglichkeiten einer verkürzten Wadenmuskulatur werden unterschieden in operative und konservative Ansätze. Lange Zeit wurde in Bezug auf eine verkürzte Wadenmuskulatur ausschließlich ausgeprägten Krankheitsbildern mit manifesten Verkürzungen (Spitzfuß) Aufmerksamkeit gewidmet, während dezentere

Ausprägungen nicht beachtet wurden. Durch diese Betrachtungsweise erklärt sich auch das Ungleichgewicht in der Studienlage zugunsten der operativen Herangehensweise. Durch das gewachsene Verständnis und die gewonnenen Erkenntnisse der Zusammenhänge steigt jedoch auch die Notwendigkeit für adäquate Behandlungsansätze bei Krankheitsbildern, die nicht primär operativ gelöst werden können bzw. sollten.

Nach wie vor stellt eine ausgeprägte Spitzfußstellung wie sie z.B. bei Kindern mit infantiler Zerebralparese auftritt, die Hauptindikation für operative Eingriffe an der Wadenmuskulatur dar. Bereits in den Jahren 1913 und 1924 beschreiben Nils Silfverskiöld, Oskar Vulpius und Adolf Stoffel eine Operationstechnik zur Behandlung des Pes equinus. Die Technik bestand in der Verlagerung des M. gastrocnemius-Ursprungs von den Femurkondylen auf die Tibia (Vulpius and Stoffel 1913, Silfverskiöld 1924). Der M. gastrocnemius wurde dadurch von einem biartikulären zu einem monoartikulären Muskel und die plantarflektierende Wirkung auf den Calcaneus konnte reduziert werden. Im Zuge der operativen Behandlung von Beschwerden erfolgt oft eine Verlängerung der Muskel-Sehnen-Einheit des M. gastrocnemius/ soleus Komplexes, wobei hier unterschiedliche Operationstechniken angewandt werden: Rezession der Wadenmuskulatur (Strayer / Baumann), indirekte oder direkte Verlängerung der Achillessehne. Ziel aller Operationstechniken ist eine Zunahme der Dorsalextension im OSG (Barske, DiGiovanni et al. 2012, Barske, DiGiovanni et al. 2013, Rong, Li et al. 2016).

Zu den konservativen Behandlungsmethoden in Form von Dehnprogrammen existieren verschiedene Studien bezüglich der Verbesserung der Dorsalextension im oberen Sprunggelenk (Etnyre and Abraham 1986, Grady and Saxena 1991, Radford, Burns et al. 2006, Johnson, Bradley et al. 2007, Nakamura, Ikezoe et al. 2016). Es existieren jedoch kaum Studien, die die Wirksamkeit von Dehnprogrammen als adäquate Behandlungsmaßnahme etablieren.

2.5 Muskuläre Dehnung und deren Auswirkung auf das Ausmaß der Dorsalextension im OSG

Bei Betrachtung der Studien, die die Auswirkung von Dehninterventionen auf das Ausmaß der Dorsalextension im OSG untersuchen, stößt man auf unterschiedliche Herangehensweisen und auch sehr unterschiedliche Ergebnisse. Einen guten Überblick ermöglicht zunächst einmal das Review von Radford et al. (Radford, Burns et al. 2006). Die fünf eingeschlossenen Studien führen alle eine statische Dehnintervention durch. Die untersuchten Studien beinhalten Dehnzeiten von 5-60 min und werden mit einer Dauer, die von einmaliger Dehnung bis 6 Wochen reichen, durchgeführt. Die Interventionen führen zu einer durchschnittlichen Vergrößerung von $2,1^{\circ}$ - $3,0^{\circ}$. Bei fast allen Studien außer bei Youdas et al. (Youdas, Krause et al. 2003) wurden die Messungen direkt im Anschluss an die letzte Dehnung durchgeführt. Die Compliance ist bei nahezu allen Studien, aufgrund der Supervision durch die Untersucher sehr hoch. Bei Youdas et al. erfolgte keine Supervision. In der Studie von Gajdosik et al. bei älteren Frauen wird mit einem statischen Dehnprogramm über 8 Wochen eine durchschnittliche Veränderung von $5,1^{\circ}$ erzielt (Gajdosik, Vander Linden et al. 2005). Petty et al. kommen bei einem 4 wöchigen Dehnprogramm auf eine durchschnittliche Vergrößerung des ROM von $6,4^{\circ}$ (Petty 1998). Johnson et al. berichten in ihrer ebenfalls an älteren Frauen durchgeführten Studie über eine Zunahme von durchschnittlich $12,3^{\circ}$ nach einem 6-wöchigen statischen Dehnprogramm (Johnson, Bradley et al. 2007). Ebenso berichten Mahieu et al. 2009 eine Vergrößerung von 6° durch ein 6-wöchiges Dehnprogramm (Mahieu, Cools et al. 2009). In einer achtwöchigen Studie mit männlichen und weiblichen Läufern geben Macklin et al. die durch eine statische Intervention erzielte Vergrößerung mit $10,5^{\circ}$ an (Macklin, Healy et al. 2012). Diese Angaben können nur als grobe Orientierung dienen, da verschiedene Parameter eine Vergleichbarkeit erschweren. Die Unterschiede der Studien beziehen sich vorwiegend auf die Auswahl der Art und Dauer der Dehnintervention (Dauer der Intervention, Dehnhäufigkeit, Dehnzeit und Art der Dehnung), die Auswahl der Probanden (Geschlecht, Alter, Sportler/Nicht-Sportler) und vor allem die Messmethodik (Flexionsgrad des Kniegelenks, Interpretation der Neutralstellung des OSG, manuelle oder maschinengestützte Messung). Die Dehninterventionen unterscheiden sich durch die Dauer der Intervention, Dehnhäufigkeit, Dehnzeit und Art der Dehnung. Aufgrund der genannten Untersuchungsunterschiede ist die Vergleichbarkeit absoluter

Gradzahlen, wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, als problematisch und nur bedingt aussagekräftig zu betrachten.

2.6 Messung plantarer Belastungsprofile mit einer Druckmessplatte (= Pedobarographie)

Die Erforschung und Messung plantarer Belastungsprofile reicht zurück bis ins Jahr 1882 durch Beely (Elftman 1934), der seine Patienten auf einen mit Pflastern gefüllten Sack steigen ließ um daraus Rückschlüsse über unterschiedliche Druckbereiche zu gewinnen. Weitere Versuche erfolgten mit Hilfe angefeuchteter Blumenerde, auf Färbefarbe mit Tinte oder verformbarem Gummi. Die Problematik der Pflaster- und Blumenerdentechnik, die vorwiegend die Fußform abbildeten, wurde mit den ausgereifteren Methoden auf Gummi- und Tintenbasis, die erstmalig statische Druckverteilungen darzustellen vermochten, überwunden. Elftmann entwickelte 1934 eine Konstruktion, die es ihm erlaubte dynamische Messungen durchzuführen (Elftman 1934). Die aktuellen Messsysteme funktionieren auf Basis elektromechanischer Sensoren. Es existieren verschiedene Systeme, die sich durch die Funktionsweise der Sensoren unterscheiden. Zu nennen sind resistive (auch Dehnungsmessstreifen), piezoresistive, piezoelektrische und kapazitative Verfahren (Engelsberger 2017).

Resistive Verfahren machen sich durch Dehnung induzierte Änderungen des Widerstands zunutze. Durch den mechanischen Druck werden die Dehnungsmessstreifen im Sensor länger und dünner und erhöhen dadurch den Widerstand. Dieses Verfahren wird daher auch als geometrieinduzierte Widerstandsänderung bezeichnet. Im Zuge der pedobarographischen Untersuchung der vorliegenden Studie wurde die „pedoscan“-Platte der Firma Diers verwendet. Die genannte Platte basiert auf diesem Prinzip.

Auch piezoresistive Verfahren basieren auf einer Widerstandsänderung. Im Gegensatz zu den resistiven Verfahren verändert der mechanische Druck in diesem Verfahren den spezifischen Widerstand des Materials. Die auftreffenden Kräfte beeinflussen die Elektronenbeweglichkeit im verwendeten Halbleitermaterial, wodurch letztlich eine elektrische Widerstandsänderung entsteht, die gemessen werden kann. Mit diesem Messverfahren können sowohl vertikal auftretende als auch tangential auftreffende Scherkräfte gemessen werden.

Piezoelektrizität nutzt die Eigenschaft spezieller Kristalle auf mechanischen Druck mit einer Ladungsverschiebung zu reagieren. Aus dieser Ladungsverschiebung entstehen

Spannungen die proportional zu den einwirkenden Kräften sind. Piezoelektrische Sensoren sind meist aus Keramik, Quarzen oder Galliumphosphat gefertigt.

Kapazitiven Verfahren liegt ein Kondensator als Messprinzip zugrunde. Eine auf die Messplatte auftreffende Kraft ändert den bestehenden Abstand zwischen den Kondensatorplatten. Diese Abstandsänderung bewirkt eine Änderung der Kapazität des Kondensators. Dieses Messsystem erfasst vertikal auftretende Kräfte, entstehende Scherkräfte werden jedoch nicht erfasst.

Alle Verfahren der Pedobarographie erfassen den Fuß während der Standphase. Es können sowohl statische Messungen (Proband steht barfuß auf der Platte) als auch dynamische Messungen (Proband läuft barfuß über die Platte) durchgeführt werden. Gängige Methoden zur Erfassung statischer und dynamischer Belastungsprofile sind in den Boden eingelassene oder in Laufbänder integrierte Plattensysteme. Es existieren zudem Messsohlen, die in die Schuhe eingelegt werden können. Die gemessenen Daten werden über ein Kabel mit USB-Anschluss oder kabellos über Bluetooth an den Computer weitergeleitet und dort abgespeichert. Anwendung findet die Pedobarographie in der Verlaufsbeurteilung der Endoprothetik, der infantilen Zerebralparese, dem diabetischen Fußsyndrom und anderen neurologischen Krankheitsbildern, die das Gangbild beeinflussen. Zudem ist es weit verbreitet bei der Anfertigung von orthopädischen Einlegesohlen für den Alltag, Freizeit- oder Leistungssport, die Füße mit Hilfe der Pedobarographie zu vermessen, um schmerzhafte Fußregionen gezielt entlasten oder unterstützen zu können.

In Abhängigkeit von der Fragestellung können verschiedene Parameter untersucht werden. Die gängigsten von Plattensystemen erfassten Parameter sind: durchschnittlicher Fußdruck, maximaler Fußdruck („peak plantar pressure“ = PPP), Fußrotation, Fußkontaktfläche, Kontaktzeit des gesamten Fußes sowie einzelne anatomische Bereiche sowie die als Linie dargestellte Bewegung des Körperschwerpunktes (centre of pressure = COP). Für die vorliegende Studie wurden die Parameter PPP, die Bodenkontaktzeit (= BKZ/Laufen) und das Druck-Zeit-Integral (DZI) in definierten Regionen der Fußsohle erfasst.

2.7 Gangzyklus und dessen Abhängigkeit von der Dorsalextension im OSG

Grundvoraussetzung für den reibungslosen Ablauf des menschlichen Gangs ist unter biomechanischen Gesichtspunkten das Vorhandensein ausreichend beweglicher Hüft-, Knie- und Sprunggelenke. Wenn eins oder mehrere der genannten Gelenke nicht im benötigten Ausmaß beweglich sind, hat das Auswirkungen auf den gesamten Gangablauf. Für diese Studie von Relevanz sind die Folgen einer eingeschränkten ROM des OSG.

Der menschliche Gang, der auch immer wieder als „kontrolliertes Fallen“ bezeichnet wird, kann in verschiedene Phasen unterteilt werden. Ein Gangzyklus beinhaltet für jedes Bein eine Stand- und eine Schwungphase. Insgesamt betrachtet macht die Standphase ca. 60% und die Schwungphase ca. 40% eines Zyklus aus. Das Gehen unterscheidet sich vom Laufen durch das Auftreten einer Doppelstützphase, bei der sich beide Füße am Boden befinden. Beim Laufen hingegen kommt es zu keiner Doppelstützphase. Anstelle der Doppelstützphase kommt es beim Laufen zu einer Flugphase (Witte 2018).

In dieser Studie wird der Gang mit einer dynamischen Pedobarographie gemessen, die nur Kontakte des Fußes mit dem Untergrund während der Standphase misst. Es handelt sich folglich um eine kinetische Messung (= Messung von Kräften). Daher wird folgend näher auf die Teilphasen der Standphase eingegangen.

Die Standphase wird nach Perry (Perry 2003) in drei Teilphasen unterteilt: Bipedale initiale Standphase, monopedale Standphase und bipedale terminale Standphase. Die monopedale Standphase des ipsilateralen Beins entspricht der Schwungphase des kontralateralen Beins. Götz-Neumann teilt die Standphase in 5 Teilphasen: initialer Bodenkontakt, Ladungsantwort, mittlere Standphase, Standphasenende und Schwungphasenvorbereitung. Die beiden Aufteilungen der Standphasen in Teilphasen ergänzen sich und werden daher auch beide für die folgende detaillierte Erläuterung des Gangzyklus herangezogen. Die Standphase beginnt mit dem Fersenkontakt auf dem Boden und endet mit dem Abheben der Zehen vom Boden. Dies stellt gleichzeitig den Beginn der Schwungphase dar.

Der initiale Bodenkontakt des ipsilateralen Beins beginnt bei leicht supiniertem Fuß mit dem Fersenaufsatz über den Fußaußenrand, was auch als „heel strike“ (HS) bezeichnet wird. Der Rückfuß ist in dieser Phase blockiert und wird über die angespannten

Dorsalextensoren stabilisiert. Das Kniegelenk ist gestreckt bis minimal gebeugt. Gleichzeitig stellt der Fersenkontakt auch den Beginn der initialen bipedalen Standphase dar. Mit zunehmender Lastaufnahme im Zuge der Ladungsantwort arbeiten die Dorsalextensoren und der M. quadriceps femoris exzentrisch und fungieren als Stoßdämpfer. In Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit wird das Kniegelenk in dieser Phase bis zu 30 Grad gebeugt. Kurz vor Erreichen der mittleren Standphase hat die gesamte Fußsohle erstmalig Bodenkontakt („foot flat“= FF). Mit Ablösen des kontralateralen Beins vom Boden beginnt die monopedale Standphase des ipsilateralen und die Schwungphase des kontralateralen Beins. Das Abheben des kontralateralen Beins markiert gleichzeitig den Beginn der mittleren Standphase („mid stance“ = MS). Während der mittleren Standphase kommt es zu einer Verlagerung des Körperschwerpunktes über den Vorfuß. Das Sprunggelenk befindet sich jedoch noch in Neutral-0-Stellung bzw. ist leicht dorsalextendiert. Das Kniegelenk ist wieder gestreckt. In der terminalen Standphase kommt es bedingt durch die weitere Vorwärtsverlagerung des Körperschwerpunktes zum Anheben der Ferse („heel off“= HO). Mit Abheben der Ferse beginnt der M. triceps surae sich zu kontrahieren und dadurch eine Plantarflexion zu bewirken. In der sich anschließenden Schwungphasenvorbereitung haben nur noch die Zehen Kontakt und das kontralaterale Bein übernimmt zunehmend im Zuge der Ladungsantwort das Gewicht. Beendet wird die Standphase durch das

Ablösen der Zehen vom Untergrund („toe off“= TO).

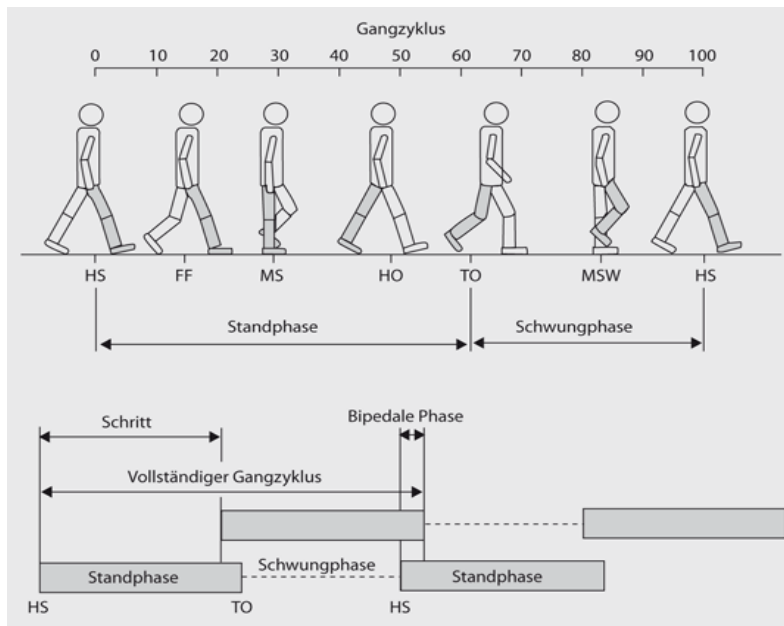


Abb.4: Phasen des menschlichen Ganges; Fersenkontakt „heel strike“ = HS; Fußsohlenbodenkontakt „flat foot“ =FF; mittlere Standphase „mid stance“ =MS; Ablösen der Ferse vom Boden „ heel off“ =HO; Ablösen der Zehen vom Boden „toe off“ = TO; mittlere Schwungphase „midswing“ = MSW; aus Trauma und Berufskrankheit 03/15(Gabel 2015), mit Genehmigung von RightsLink/Springer Nature

Entscheidend für die Auswirkung eines IGC ist die Betrachtung der Gelenkwinkel, die das Kniegelenk während der Standphase durchläuft. Zu Beginn ist es gestreckt, wird dann zur Stoßdämpfung flektiert, um anschließend in der mittleren Standphasen wieder gestreckt zu werden und auch bis zur Schwungphase gestreckt zu bleiben. Die Reextension zu Beginn der mittleren Standphase ist nach Mehlhorn et al. (Mehlhorn, Legrand et al. 2017), die sich wiederum auf Sgarlato et al. (Sgarlato, Morgan et al. 1975) beziehen, der entscheidende Moment in dem die IGC zum Tragen kommt. Das für einen physiologischen Gangablauf notwendige Bewegungsausmaß im OSG geben Mehlhorn et al mit 4-10° an. Ist das erforderliche Bewegungsausmaß nicht gegeben, zieht das ein früheres Abheben der Ferse nach sich, da die für den Gangablauf erforderliche Reextension des Kniegelenks bei eingeschränkter Dorsalextensionsfähigkeit des OSG nur auf Kosten einer verkürzten Bodenkontaktzeit der Ferse zu erreichen ist.

2.9 Sprungtests und Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus

Inwieweit sich Dehnprogramme auf die Leistungsfähigkeit bei Athleten auswirken, ist schon seit längerer Zeit Gegenstand der Forschung. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Studie dieser Aspekt in Form von Sprungtests untersucht. Sprungkraft gehört neben Schnelligkeit und Ausdauer zu den elementaren Fähigkeiten eines Fußballspielers. In der vertikalen Sprungkraftdiagnostik werden in der Regel drei gängige Sprungtypen herangezogen: Squat Jump (SJ), Counter Movement Jump (CMJ) und Drop Jump (DJ) (Wank and Heger 2009).

Der Squat Jump ist charakterisiert durch seine hockende Startposition bei 90 Grad flektiertem Hüft- und Kniegelenk. Aus dieser Anfangsposition wird der Streckapparat aktiviert und der Körper in die Höhe befördert. Der Sprung erfolgt ohne Auftaktbewegung, weswegen die beanspruchte Streckmuskulatur ausschließlich konzentrisch gefordert wird.

Der Counter Movement Jump wird in aufrechter Körperposition begonnen. Hüft- und Kniegelenk sind gestreckt. Der Sprung wird eingeleitet durch eine Hockbewegung bis ungefähr 90 Grad Kniebeugung. Diese Auftaktbewegung geht flüssig in die Streckung und den Absprung über. Der Sprung beinhaltet somit eine exzentrische und eine konzentrische Phase.

Die Ausgangsposition beim DJ gleicht dem CMJ, mit dem einzigen Unterschied, dass sich der Springer auf einer erhöhten Plattform befindet. Der Sprung wird eingeleitet durch das Vorschwingen eines Beins. Der Springer verlässt dadurch die Erhöhung. Bei der Landung wird die bodenwärts gerichtete Kraft abgebremst und der Springer streckt explosiv die Beine, um in die Höhe zu springen. Auch beim Ablauf der Arbeitsweise der Muskulatur gleicht der DJ dem CMJ- auf eine exzentrische folgt eine konzentrische Kontraktion.

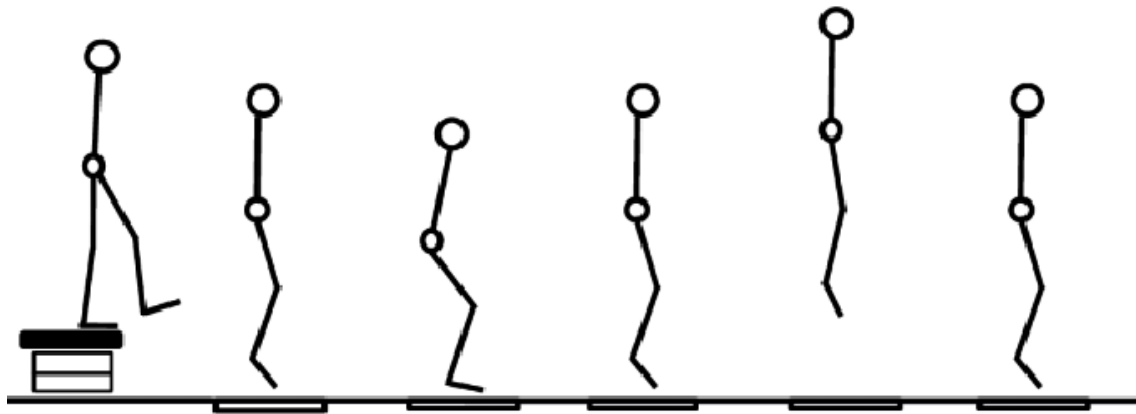


Abb.5: Schematischer Ablauf eines Drop Jumps aus Richter, 2011 (Richter 2011), mit Genehmigung von Dr. Anne Focke (ehemals Richter)

Für die vorliegende Studie wurde der DJ gewählt, da er unter den genannten Sprüngen die höchste Komplexität aufweist und sich dadurch am besten auf die Wettkampfanforderungen übertragen lässt.

Im Unterschied zu den anderen Sprungformen können beim Drop Jump neben der Sprunghöhe auch die Bodenkontaktzeit (BKZ/Sprung) und der Reaktivitätsindex ($RI = \text{Sprunghöhe} / \text{Bodenkontaktzeit}$) gemessen werden. Ziel ist es eine möglichst kurze Bodenkontaktzeit bei gleichzeitig maximaler Sprunghöhe zu erreichen. Bezüglich der Fallhöhe werden in der Literatur unterschiedliche Angaben gemacht. Bobbert verglich mehrere Drop Jump Studien und kam zu dem Ergebnis, dass kein Muster beim Zusammenhang von Fallhöhe und Leistung erkennbar ist (Bobbert and Huijing 1987). Walsh et al. untersuchten 2004 den Einfluss der Fallhöhe auf die Bodenkontaktzeit und bestätigten die Annahmen von Bobbert (Walsh, Arampatzis et al. 2004). Die verwendeten Fallhöhen in Studien bewegen sich zwischen 20-60 cm. Es besteht in der Literatur Einigkeit, dass eine Absprunghöhe, die ein bestimmtes Maß überschreitet, negativen Einfluss auf die Sprunghöhe hat, da in diesem Fall die erforderliche Bremskraft zu groß wird und es zum Bodenkontakt der Ferse beim Landen kommt. Aus diesem Grund ist die genaue Fallhöhe, solange sie sich in dem oben genannten Rahmen bewegt, nicht entscheidend für BKZ/Sprung und Sprunghöhe.

Zugrunde liegender Mechanismus des CMJ und des DJ ist der Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (DVZ; englisch: „stretch shortening cycle = SSC). Auf eine dehnende exzentrische Kontraktion der betreffenden Muskulatur folgt eine verkürzende

konzentrische Muskelaktion. Dieser Wechsel der Kontraktionsformen in einem Muskel wird als DVZ bezeichnet. Durch den fließenden Übergang von exzentrischer zu konzentrischer Muskularbeit kann die Leistung, in diesem Fall die Sprunghöhe, im Vergleich zu einer isolierten konzentrischen Kontraktion verbessert werden. Als Gründe werden die Voraktivierung des Muskels, der über den Golgi Sehnenapparat vermittelte Muskeldehnungsreflex und die Speicherung von Energie in elastischen Komponenten des Muskelsehnenapparats angenommen (Komi 2000, Gollhofer, Taube et al. 2009). Es wird zwischen einem kurzen und einem langen DVZ unterschieden. Der Drop Jump läuft im kurzen DVZ ab. Die für einen kurzen DVZ erforderliche BKZ/Sprung wird in der Literatur in der Regel mit Zeiten < 200 ms angegeben.

3. Fragestellung und Zielsetzung

Primäres Ziel der vorliegenden Studie ist die Untersuchung der Auswirkungen eines Wadendehnungsprogramms auf das plantare Belastungsprofil des Fußes:

Kernfrage: Bewirkt ein achtwöchiges PNF-Dehnprogramm eine Reduktion der Vorfußbelastung bei semiprofessionellen Fußballern?

Für die Prüfung der Kernfrage werden folgende Annahmen gemacht:

1. Fußballspieler haben eine verkürzte Wadenmuskulatur.

Die Prüfung dieser Annahme erfolgt über den präinterventionellen Wert der ROM im OSG (Silfverskiöld Test).

2. Ein achtwöchiges PNF Dehnprogramm bewirkt eine Vergrößerung der ROM im OSG bei Fußballspielern.

Die Prüfung dieser Annahme erfolgt über den Vergleich von prä- und postinterventionellen Werten der ROM im OSG (Silfverskiöld Test).

3. Die Vorfußbelastung wird mit zunehmender Dehnung der Wadenmuskulatur reduziert.

Die Prüfung dieser Annahme erfolgt über den Vergleich von prä- und postinterventionellen Werten der Pedobrographie (Peak Plantar Pressure (PPP), Kontaktzeiten sowie Kraft-Zeit-Integrale), der Schmerzangaben und der plantaren Beschwiellung.

4. Die Dehnintervention bewirkt eine Verkürzung der Bodenkontaktzeit und Vergrößerung der Sprunghöhe bei reaktiven Sprüngen.

Die Prüfung dieser Annahme erfolgt über den Vergleich der prä- und postinterventionellen Werte der KG und IG.

5. Spieler mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit in der Vorgeschichte weisen eine überdurchschnittlich geringe ROM im OSG auf.

Die Prüfung dieser Annahme erfolgt über den Vergleich der präinterventionellen ROM Werte von Spielern mit erhöhter Verletzungsanfälligkeit (≥ 2 Verletzungen in der Vorgeschichte) und Spielern ohne erhöhte Verletzungsanfälligkeit (< 2 Verletzungen in der Vorgeschichte).

4. Material und Methoden

4.1 Probanden

Für die Untersuchung wurden Spieler der ersten und zweiten Mannschaft des Fußballvereins FC Astoria Walldorf (1. Mannschaft: Regionalliga Südwest, 2. Mannschaft („unter 23 Jahre“ =U23): Oberliga Baden-Württemberg) ausgewählt. Es wurden sowohl in der Kontrollgruppe (KG) als auch in der Interventionsgruppe (IG) die kompletten Mannschaften in die Studie eingeschlossen. Es wurden zunächst alle Spieler eingeschlossen, die Teil einer der beiden Mannschaften waren. Jeder einzelne Proband wurde im Zuge der EU befragt ob eine Teilnahme gewünscht ist und das Einverständnis zur anonymisierten Auswertung der Daten mit einer Unterschrift festgehalten (siehe Anhang: Einverständniserklärung). Es wurde ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine Verweigerung der Teilnahme sich nicht nachteilig auf die weitere Karriere im Verein auswirkt. Die Wahl fiel auf diesen Verein, da der Doktorand ein ehemaliger Spieler des Vereins ist und so den Kontakt herstellen konnte. Der Kader der ersten Mannschaft umfasste zum Erhebungszeitpunkt 22 Spieler. Der Kader der zweiten Mannschaft betrug zum Erhebungszeitpunkt 19 Spieler. Alle Spieler waren zum Zeitpunkt der Erfassung mindestens 5 Jahre Teil einer Mannschaft, die durchschnittlich mindestens 4 Einheiten à 1,5 h (Spiel oder Training) pro Woche absolviert. Alle Spieler, die zum Zeitpunkt der EU unter einer Verletzung litten, wurden nicht in die Studie eingeschlossen. Zwei Monate vor der EU wurde der Inhalt der Studie den Spielern erstmalig vorgestellt. Am Tage der EU erfolgte eine weitere Einweisung in das Procedere und den Inhalt der Studie. Es wurden Infobroschüren (siehe Anhang) verteilt. Die Studie wurde der Ethikkommission der Universität Marburg vorgelegt und durch diese genehmigt (Bestätigung der Ethikkommission im Anhang).

4.2 Studiendesign

Die Studie wird als Parallelgruppendesign durchgeführt. Es gibt eine Kontrollgruppe, die keine Intervention in Form eines Dehnprogramms durchführt und eine Interventionsgruppe, die ein in das Mannschaftstraining integriertes, achtwöchiges Dehnprogramm absolviert. Die erste Mannschaft bildet die Interventionsgruppe,

während die U23 als Kontrollgruppe ihr übliches Training durchführt. Die erste Mannschaft wurde als Interventionsgruppe ausgewählt, da in dieser Mannschaft eine engere Supervision durch Trainer und Physiotherapeuten gewährleistet werden kann. Dies ist bedingt durch einen besseren Personalschlüssel der ersten Mannschaft im Vergleich zur U23. Während bei der U23 nur Trainer und Co- Trainer bei jeder Trainingseinheit anwesend sind, sind beim Training der ersten Mannschaft in der Regel Trainer, Co-Trainer, Torwart-Trainer und ein Physiotherapeut anwesend und können so eine bessere Compliance und korrekte Durchführung der Dehnintervention gewährleisten. Eine Randomisierung auf individueller Ebene ist nicht möglich, da die Intervention in der Gruppe durchgeführt wird.

Von der Studie ausgeschlossen werden Spieler, die zum Zeitpunkt der EU oder der Abschlussuntersuchung (=AU) verletzt sind. Außerdem werden Probanden von KG und IG, die verletzungsbedingt oder aus anderen Gründen innerhalb der 8 Wochen im Durchschnitt < 2 Einheiten pro Woche und somit < 16 Einheiten insgesamt absolvieren, ebenfalls ausgeschlossen.

Die Trainingsanwesenheit der Probanden wird von den Trainern/Co-Trainern der Mannschaften dokumentiert. Eine Teilnahme am Training/Spiel wird als durchgeführte Dehnintervention gewertet.

4.3 Ablauf der Studie

Die Untersuchungen werden auf dem Trainingsgelände des Vereins FC Astoria Walldorf durchgeführt. Für die Untersuchungen steht ein Raum zur Verfügung, der mit einer Untersuchungsfläche und einem Tisch ausgestattet ist. Sämtliche Untersuchungen werden von dem selben Untersucher durchgeführt. Bei dem Untersucher handelt es sich um den Doktoranden der vorliegenden Studie. Der Untersucher ist mit allen für die Studie relevanten klinischen Untersuchungstechniken vertraut und wurde durch einen fachkundigen Mitarbeiter der Firma Diers in Hard- und Software der „pedoscan Druckmessplatte“ eingeführt.

4.3.1 Eingangsuntersuchung

Zu Beginn unterzogen sich alle Spieler der KG und IG einer Eingangsuntersuchung (= EU). Diese EU besteht aus der Erhebung der Anamnese, klinischer Untersuchung und funktionellen Untersuchungen mit der „pedoscan“ Messplatte. Die Anamnese wurde anhand eines selbsterstellten Anamnesebogens durchgeführt (siehe Anhang), bei dem die Schmerzintensität im Vorfußbereich anhand der numerischen Rating-Skala (NRS) erfasst wird. Die klinische Untersuchung beinhaltet die Beurteilung von Beinlänge, Beinachse, Rückfußachse, Vorfuß-/Zehendeformitäten, Beschwielung der Fußsohle und Silfverskiöld Test. Die Untersuchung mit der „pedoscan“ besteht aus zwei Teilen: 1. Die Erfassung des dynamischen plantaren Belastungsprofils (PPP, DZI und BKZ/Laufen) bei Überschreiten der Platte. 2. Die Erfassung von Sprunghöhe und Bodenkontaktzeit von Drop-Jumps.

Die Spieler der Interventionsgruppe beginnen nach der Erstuntersuchung mit der 8-wöchigen PNF Dehnintervention, die zusätzlich zum üblichen Training durchgeführt wird. Die Trainer und Physiotherapeuten weisen in jedem Training auf die Durchführung des Dehnprogramms hin und richten Zeit für die Durchführung ein. Die Kontrollgruppe unternimmt keine Veränderungen ihrer Trainingsgewohnheiten im Interventionszeitraum.

Der Doktorand hat den Probanden und Betreuern einmalig den Inhalt und Ablauf der Studie in einer Präsentation theoretisch erklärt, zusätzlich am ersten Tag der Intervention das Dehnprogramm vorgeführt und die Interventionsgruppe angeleitet. Außerdem steht er für aufkommende Fragen zur Durchführung und Steigerung der Compliance während der ersten Interventionswoche vor Ort zur Verfügung.

4.3.2 Abschlussuntersuchung

Nach Ende des achtwöchigen Interventionszeitraumes werden die Probanden erneut klinisch untersucht. Es erfolgt zudem eine erneute dynamische Messung des plantaren Belastungsprofils, eine Messung der Sprungkraft und Bodenkontaktzeit und es wird erneut das Schmerzempfinden im Vorfußbereich mit der NRS dokumentiert.

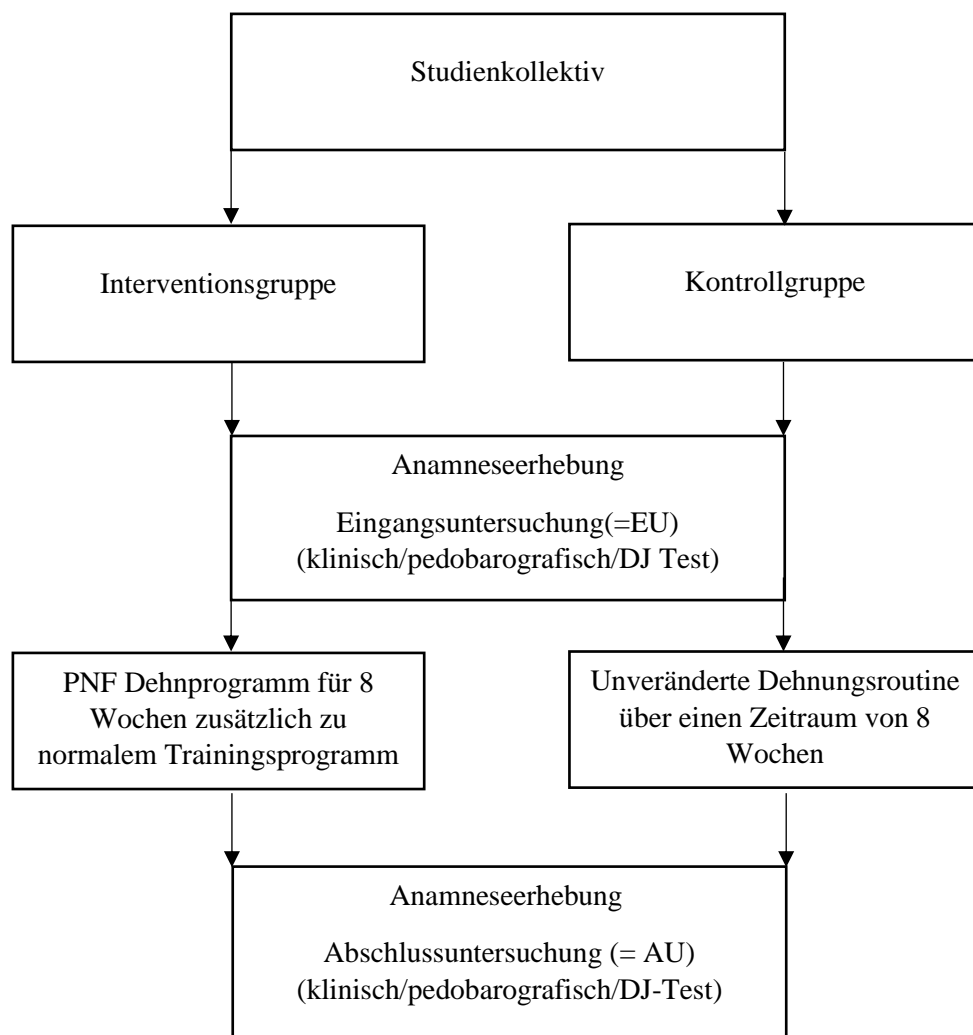


Abb. 6: Schematischer Ablauf der Studie

4.3.3 Zeitbedarf

Für die einführende Einweisung, die die Inhalte der Studie erläutert, die Vorführung des Dehnprogramms und eventuell aufkommende Fragen werden ca. 20 min veranschlagt. Die Erläuterung des Studieninhalts erfolgt für alle Probanden aus sowohl der Interventions- als auch der Kontrollgruppe gemeinsam. Die praktische Einführung in das Dehnprogramm entfällt für die Kontrollgruppe. Für die klinische Untersuchung, sowie Erfassung und Dokumentation der weiteren oben beschriebenen Parameter werden pro Spieler ebenfalls jeweils 20 min für Eingangs- und Abschlussuntersuchung benötigt. Für die Kontrollgruppe fällt kein weiterer zeitlicher Aufwand an. Die Interventionsgruppe benötigt für die Dehnintervention pro Training/Spiel, wenn sie exakt wie von Mahieu et al. beschrieben, durchgeführt wird, knapp 5 min (280 sec).

4.4 Anamnese

Im Zuge der Erstuntersuchung werden neben der klinischen Untersuchung und der Erfassung der funktionellen Parameter mit der Messplatte weitere Informationen mit Hilfe eines Anamnesebogens erhoben. Der Fragebogen wird von den Probanden im Beisein des Untersuchers ausgefüllt. Mögliche von den Probanden aufkommende Fragen bezüglich des Anamnesebogens können so direkt geklärt werden. Außerdem wird so möglichen Missverständnissen oder Unklarheiten von Seiten des Untersuchers durch unklare Formulierungen der Probanden vorgebeugt. Neben der biographischen Anamnese der Probanden (Alter, Größe, Gewicht) wird die Verletzungshistorie der Spieler bezogen auf Verletzungen distal des Kniegelenks dokumentiert. Verletzungen des Kniegelenks selbst, Verletzungen distal des Kniegelenks und Verletzungen mit einer Ausfallzeit von weniger als 2 Wochen werden nicht erfasst. Weiterhin werden Schmerzen im Vorfußbereich (die Quantifizierung der Schmerzen erfolgt mit einer numerischen Rating-Skala von 1-10) und die Spieldauer (Jahre in denen Fußball in einem Verein gespielt wurde) der Probanden notiert.

4.5 Klinische Untersuchung

Die klinische Untersuchung beinhaltet die Beurteilung von Beinlänge, Beinachse, Rückfußachse, Vorfuß-/Zehendeformitäten, Beschwielung der Fußsohle und Silfverskiöld Test. Sie wird bei den Probanden beider Gruppen zu Beginn im Rahmen der EU durchgeführt.

4.5.1 Beinlänge

Für die Untersuchung auf eine möglicherweise bestehende Beinlängendifferenz steht der Proband barfuß mit dem Rücken zum Untersucher. Der Untersucher palpiert mit beiden Händen die Beckenkämme, legt dann die flach ausgestreckte Hand auf den höchsten Punkt des Beckens - und kann so mögliche Beinlängendifferenzen detektieren. Es werden hierbei nur Beinlängendifferenzen von mehr als 1cm festgehalten.

4.5.2 Beinachse

Für die Beurteilung der Beinachse steht der Proband aufrecht und barfuß. Die Füße stehen parallel. Durch Betrachtung der Beinachse wird unterschieden, ob es sich um eine valgische, varische oder normale Beinachse handelt. Hierfür werden der Abstand der medialen Femurkondylen und der Innenknöchelabstand am Sprunggelenk gemessen. Ein Abstand von $\geq 3\text{cm}$ der medialen Femurkondylen wird als varische Beinachse gewertet. Ein Abstand von $\geq 3\text{cm}$ der Innenknöchel wird als valgische Beinachse gewertet (Samaei, Bakhtiary et al. 2012).

4.5.3 Rückfußachse

Zur Beurteilung der Rückfußachse verbleibt der Proband in der zuvor beschriebenen Position vor dem Untersucher. Hierbei wird die Rückfußachse vom Untersucher in Orientierung an der Unterschenkelachse hinsichtlich varisch, valgisch oder normal eingeschätzt. Anschließend werden die Füße auf Zehendeformitäten untersucht.

4.5.4 Beschwiellung Fußsohle

Im Anschluss legt sich der Proband mit dem Rücken auf eine Untersuchungsfläche und der Untersucher betrachtet die Fußsohlen hinsichtlich ihres Beschwiellungsmusters. Hierbei wird zunächst entschieden ob eine übermäßige Verhornung vorliegt. Falls dies der Fall ist wird zusätzlich der Ort der Schwielen festgehalten.

4.5.5 ROM im OSG und Silfverskiöld Test

Die Dokumentation der ROM im oberen Sprunggelenk wird mit dem Silfverskiöld Test untersucht. Die korrekte Durchführung und Beachtung möglicher Fehlerquellen richtet sich nach der Beschreibung des Silfverskiöld Tests von Barouk et al in „Clinical Diagnosis of Gastrocnemius Tightness“ (Barouk and Barouk 2014). Der Artikel erschien in Foot and Ankle Clinics im Jahre 2014 im Zuge einer Sonderausgabe mit dem Titel „The Gastrocnemius“ und beschreibt die korrekte Durchführung sehr

detailliert. Aus diesem Grund stellt er in der vorliegenden Studie die Basis einer korrekten Durchführung des Silfverskiöld-Tests dar. Mit Hilfe eines Goniometers wird die Beweglichkeit des OSG bei gestrecktem und gebeugtem Kniegelenk gemessen. Die Zuverlässigkeit dieses Verfahrens, insbesondere, wenn nur von einem Untersucher durchgeführt, belegen die Studien von Ekstrand et al und Elveru et al. (Ekstrand, Wiktorsson et al. 1982, Elveru, Rothstein et al. 1988).

Der Proband liegt mit dem Rücken auf einer Untersuchungsfläche. Bei gestrecktem Knie und Neutralposition wird die passive Dorsalextension im OSG untersucht (Symeonidis 2014). Für die Ermittlung korrekter Werte weisen Barouk et al. auf die Bedeutung des manuellen Ausgleichs einer valgischen Fersenausrichtung hin, die insbesondere bei Vorliegen eines Knick-Plattfußes häufig zu beobachten ist. Der Fuß wird vor Beginn der Dorsalextension in eine neutrale oder varische Position gebracht werden. Im Anschluss übt der Untersucher Druck im Bereich der Metatarsalia aus und fixiert gleichzeitig die Neutralstellung der Ferse. Es wird darauf geachtet sowohl in gebeugter und gestreckter Stellung als auch bei den verschiedenen Probanden den gleichen Druck auszuüben. Hierzu übt der Untersucher vor jeder Testdurchführung, die von Barouk et al. genannten 1,5-2 kg für einige Sekunden auf einer Waage aus. Die Untersuchungen von Elveru et al. und Ekstrand et al. zeigen, dass hiermit eine gute Intrareliabilität erzielt werden kann (Ekstrand, Wiktorsson et al. 1982, Elveru, Rothstein et al. 1988).

Anschließend wird das Bein im Kniegelenk in eine 90 Grad Stellung gebracht wie es bereits DiGiovanni et al. 2002 in „Isolated gastrocnemius tightness“ (DiGiovanni, Kuo et al. 2002) beschreiben und der gleiche Ablauf wiederholt. Hierbei wird die zweite Hand des Untersuchers am distalen Femur platziert, um die rechtwinklige Position im Kniegelenk während der Druckausübung auf den Fuß zu fixieren. Während des gesamten Ablaufs wird darauf geachtet, dass der Proband sich nicht aktiv an der Dorsalextension im OSG beteiligt, da mit diesem Test die passive Beweglichkeit überprüft wird und im Falle einer aktiven Dorsalextension keine Vergleichbarkeit gewährleistet wäre. Gleiches gilt für die Beugung im Kniegelenk, die durch den Untersucher stabilisiert und nicht durch den Probanden gehalten wird, da eine aktive Flexion im Kniegelenk häufig dazu führt, dass gleichzeitig die an der Dorsalextension beteiligten M. tibialis anterior, M. extensor hallucis longus und M. extensor digitorum longus aktiviert werden. Durch eine aktive Beteiligung an der Dorsalextension wäre ein größeres Bewegungsausmaß möglich und die Werte wären verzerrt (Barske, DiGiovanni et al. 2012).

Das Goniometer wurde vor Untersuchungsbeginn in einer Linie an der äußeren Wade des Probanden mit Hilfe eines Tapes fixiert. Der unbewegliche Arm des Goniometers, der in einer Linie mit dem Wadenrelief fixiert wurde, endet exakt an der Ferse. Der Drehpunkt des Goniometers liegt im Bereich der lateralen Ferse. Der bewegliche Arm des Goniometers artikuliert somit im Fersenbereich und kann während der Untersuchung mitbewegt werden. Die Gradzahl der erzielten Dorsalextension wird bei Erreichen der Endposition abgelesen. Die Gradzahl des Bewegungsausmaßes ergibt sich aus der Differenz der Neutralposition ($= 90^\circ$) und dem in der Endposition gemessenen Winkel.

Der einzige Unterschied zu der Durchführung von Barouk et al. in der vorliegenden Studie liegt in der Definition der Neutralposition. Aus Gründen der besseren Reproduzierbarkeit wird die Neutralposition bei 90° festgelegt und nicht die Position des Fußes in vollständig entspanntem Zustand. Wenn durch die applizierte Kraft nicht die Neutralstellung erreicht werden kann und Gradzahlen $>90^\circ$ gemessen werden, wird die Differenz zur Neutralstellung als negativer Wert angegeben. Wenn die applizierte Kraft dazu führt, dass gerade die Neutralstellung von 90° erreicht werden kann, wird das ROM folglich mit 0° angegeben. Wenn bei Kraftapplikation Werte von $<90^\circ$ gemessen werden, wird die Differenz als positiver Wert der ROM im OSG angegeben.



Abb.7: Befestigung des Goniometers am Unterschenkel, eigene Aufnahme, mit Genehmigung des Probanden

Aus den Werten der ROM mit dem Silfverskiöld Test in flektierter und gestreckter Stellung des Kniegelenks, lässt sich eine mögliche isolierte M.gastrocnemius-Verkürzung ablesen.

4.6 Pedobarographische Untersuchungen

Für die objektive Erfassung des plantaren Belastungsprofils, der Sprunghöhe und Bodenkontaktzeit wird das Fußdruckerfassungs- und Ganganalysesystem pedoscan der Firma Diers, mit Sitz in Schlangenbad, Deutschland, verwendet. Hersteller der Platte ist die Firma RS Scan. Auf einer Fläche von 578mm x 418mm x 12mm verteilen sich 4096 Sensoren, mit einer Größe von 5,08 mm x 7,62 mm. Die aktive Sensorfläche ist 488mm x 325mm groß. Die Messungen erfolgen mit einer Abtastfrequenz von 300 Hz (= 300 Messungen pro Sekunde). Mit den kalibrierten Messsensoren werden absolute Werte [Newton] erfasst. Es können Werte im Bereich von 1-127 N/cm² detektiert werden. Die Sensoren arbeiten mit einer resistiven Messtechnik. Die Datenübermittlung von der Platte auf den Computer erfolgt über ein Kabel mit USB Anschluss (Scan 2019).

Die der Platte zugehörige Software DICAM3 teilt den Fuß automatisch in einzelne Segmente auf (Hallux, Zehen 2-5, Metatarsus 1-5, Mittelfuß, mediale und laterale Ferse). Um mögliche Systemfehler zu verhindern, bedarf die Aufteilung jedoch einer abschließenden Bestätigung des Untersuchers und kann im Zuge dessen unter Umständen noch manuell angepasst werden. In der vorliegenden Studie werden Metatarsus 1-5 als Vorfuß zusammengefasst. Die mediale und laterale Ferse wird ebenfalls zu einem Gesamtfersenwert zusammengefasst. Zur Beurteilung der Vorfußbelastung werden die Segmente Hallux, Vorfuß und Ferse ausgewertet. Die Daten des Mittelfußes werden aufgrund der zu vernachlässigenden Bedeutung während des Abrollvorgangs nicht näher beleuchtet.

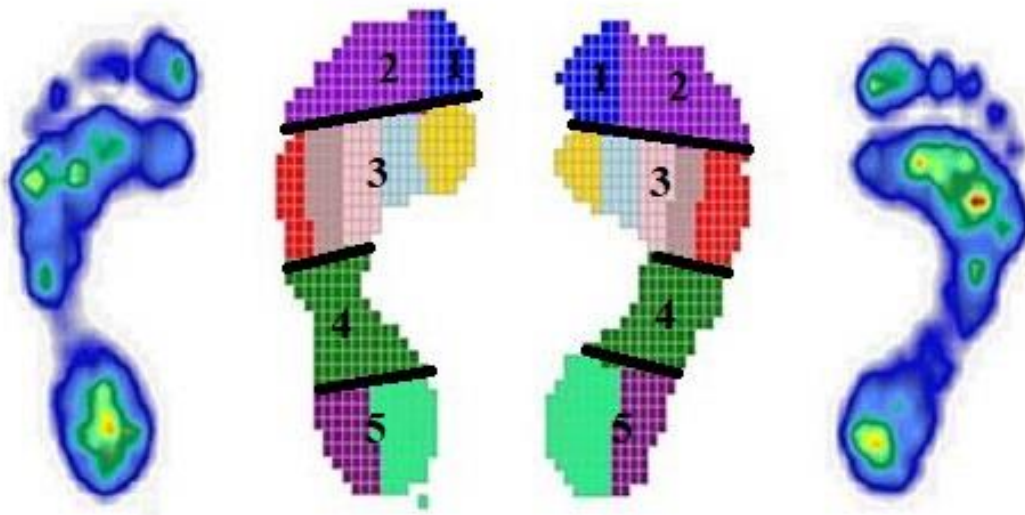


Abb.8: Exemplarische automatische Segmentierung des Abdrucks aus Diers International 2017 (International 2017): **1:** Hallux; **2:** Zehen 2-5; **3:** gesamter Vorfuß **4:** Mittelfuß; **5:** gesamte Ferse, mit Genehmigung von Diers International GmbH

Mit Hilfe dieser funktionellen Diagnostik des Fußes können pathologische Belastungsmuster detektiert und dokumentiert werden. Zur Erfassung des dynamischen Belastungsprofils laufen die Spieler über die 1,2 cm hohe Platte. Hierbei wird darauf geachtet, dass die Spieler mit ausreichend Abstand zur Platte zu laufen beginnen und auch nach Plattenkontakt ihren Gang für einige Schritte fortsetzen. Die gesamte Laufstrecke misst ca. 7 m. Die Platte wird in der Mitte dieser Strecke positioniert. Um eine möglichst gleichmäßige und vergleichbare Geschwindigkeit zu gewährleisten wird die Schrittgeschwindigkeit mit 100 bpm durch ein Metronom vorgegeben. Außerdem wird ausdrücklich darauf hingewiesen, den Blick nicht auf den Boden bzw. die Platte zu richten. Durch diese Vorgabe wird erreicht, dass nicht explizit darauf geachtet wird den Fuß möglichst mittig oder bewusst auf die Platte zu setzen wodurch die Schrittlänge verändert und infolgedessen das Belastungsprofil verfälscht würde. Es wird dabei bewusst in Kauf genommen, dass einige Versuche erforderlich sind, um den gesamten Fuß zu erfassen. Diese Vorgaben dienen dem Ziel ein möglichst natürliches Gangbild zu erzielen. Die fehlerhaften Versuche werden im Anschluss gelöscht. Der Proband läuft so oft über die Platte, bis pro Fuß drei vollständige Abbildungen aufgezeichnet wurden. Diese werden anschließend gespeichert. Aus diesen jeweils drei Aufzeichnungen pro Fuß ermittelt die Software einen durchschnittlichen Schritt. Die Software vergleicht den mittleren Schritt anschließend mit den drei gemessenen

Schritten und ermittelt den Schritt, der dem mittleren Schritt am nächsten kommt. Dies hat den Vorteil, dass nicht ein fiktiver mittlerer Schritt untersucht wird, sondern ausschließlich reale Schritte miteinander verglichen werden.

Zur Untersuchung der lokalen Gewebebelastungen der Fußsohle spielt der Parameter Druck eine entscheidende Rolle. Die Größe Druck ist definiert über die Kraft, gemessen in Newton [N], dividiert durch eine definierte Fläche, gemessen in Quadratzentimeter [cm²]. Der maximale Druck, der innerhalb dieses definierten anatomischen Bereichs gemessen wird, wird als „peak plantar pressure“ (=PPP) bezeichnet. Ein weiterer Aspekt zur Beurteilung der plantaren Belastung ist die Dauer, in der einzelne anatomische Bereiche, den Drücken ausgesetzt sind. Aus diesem Grund werden die Bodenkontaktzeiten (BKZ/Laufen) der einzelnen anatomischen Bereiche erfasst. Die Bodenkontaktzeit der jeweiligen anatomischen Bereiche ermittelt sich über die Zeitspanne zwischen der ersten und letzten Belastung eines Sensors aus dem jeweiligen Segment. Die ermittelten Bodenkontaktzeiten werden anschließend durch die Bodenkontaktzeit des gesamten Fußes geteilt und folglich in Prozent angegeben. Durch den Bezug zur gesamten Bodenkontaktzeit kann eine deutlich bessere Vergleichbarkeit erzielt werden. Neben dem maximalen Druck und der Belastungsdauer ist für die Beurteilung der Belastung zudem entscheidend mit welcher Dauer Druck auf die Fußsohle wirkt. Aus diesem Grund wird als dritter Parameter zur Quantifizierung der plantaren Belastung das Druckzeitintegral verwendet. Hierfür werden alle Druckwerte, die innerhalb des jeweiligen anatomischen Bereichs gemessen werden, in einen zeitlichen Zusammenhang gesetzt und anschließend das Integral gebildet. Es wird die Fläche unterhalb der Druckzeitkurve berechnet. Somit ist das Druckzeitintegral Ausdruck der Gesamtbelastung der anatomischen Bereiche.

4.7 Sprungtest

Als weitere funktionelle Parameter werden Sprunghöhe, Bodenkontaktzeit und Reaktivitätsquotient gemessen.

Die BKZ/Sprung kann mit Hilfe der pedoscan Messplatte über die Zeitspanne zwischen T1= Landung auf der Platte und T2= Verlassen der Platte berechnet werden. Diese Zeitspanne wird folgend mit t- Kontakt-Sprung bezeichnet.

Die Sprunghöhe wird mit der Formel

$$h = 1/2 \cdot g \cdot (t/2)^2$$

ermittelt, wobei t hier die Flugphase ist (t -Flug).

Der Reaktivitätsquotient (auch Reaktivitätsindex = RI) berechnet sich mit der Formel Sprunghöhe/Bodenkontaktzeit:

$$RI = h/t.$$

In der genannten Formel steht das t für t - Kontakt-Sprung.

Für die Messung steht der Proband auf einer 24 cm hohen Erhöhung. Vor der Erhöhung liegt die 1,2 cm hohe Messplatte. Um direkte Rückschlüsse auf die Wadenmuskulatur zu gewinnen, wird ein leicht modifizierter Drop Jump mit möglichst gestreckten Kniegelenken durchgeführt, um die Kraft möglichst aus dem Sprunggelenk zu generieren. Ziel dieses Sprungs ist es eine maximale Sprunghöhe bei minimaler BKZ/Sprung zu erzielen. Durch diese besondere Ausführung besteht ein engerer Bezug zwischen den gemessenen Parametern und der Wadenmuskulatur als bei einem tiefen Drop Jump, der vorwiegend bestimmt ist durch die Kontraktionsfähigkeit des Quadrizeps. Während der Flugphase und Landung wird darauf geachtet, dass Knie und Hüftgelenke in voller Streckung bleiben. Weiterhin wird der Proband aufgefordert die Hände in die Hüfte zu stützen, um die Zuhilfenahme der Arme beim Sprung zu unterbinden und die Übertragung des Armimpulses auszuschließen. Vor dem ersten Sprung werden die Probanden aufgefordert sich für 5-10 min individuell aufzuwärmen und Probesprünge durchzuführen, um sich mit dem Ablauf vertraut zu machen. Die Anzahl der Probesprünge sollte 5 nicht übersteigen, um eine Vorerrmüdung zu verhindern. Sprungversuche, die nicht den Anforderungen entsprechen, werden gelöscht und nach einer Erholungszeit von 2 min wird der Versuch erneut durchgeführt. Die Probanden werden immer wieder darauf hingewiesen eine maximale Sprunghöhe bei möglichst kurzer BKZ/Sprung zu erzielen. Insgesamt werden drei Sprünge pro Proband erfasst, wobei auch hier eine Pausenzeit von 2 min zwischen den Sprüngen eingehalten wird. Absolute Ausschluss-/Wiederholungskriterien sind Mitschwingen der Arme und starke Flexion von Hüft- und oder Kniegelenken während der Flugphase. Relatives Ausschlusskriterium ist eine Beugung des Kniegelenks bei der Landung und eine daraus resultierende Einbeziehung des M. quadrizeps und der Glutealmuskulatur für den Absprung. Die Entscheidung ob ein Versuch als gültig gewertet wird oder nicht trifft der Untersucher. Sprungversuche, bei denen beschriebene vermehrte Kniebeugehaltungen eingenommen werden, sind nur ein relatives Ausschlusskriterium, da in diesen Fällen eine vergrößerte Sprunghöhe auf Kosten der BKZ/Sprung gehen

würde und sich dieser Umstand entweder durch die Formel des Reaktivitätsquotienten ausgleichen oder durch eine zu hohe BKZ/Sprung ohnehin zum Ausschluss führen würde. Die Bodenkontaktzeiten für einen optimalen Drop Jump werden in der Literatur mit Zeiten < 200 ms angegeben (Güllich and Schmidtbleicher 1999). Da es sich jedoch um einen technisch anspruchsvollen Sprung handelt werden häufig auch BKZ/Sprung von < 250 ms als Grenzwert toleriert (Hohmann, Lames et al. 2002). Ramirez-Campillo et al. (Ramirez-Campillo, Álvarez et al. 2019) schließen in ihrer Studie, in der sie die Auswirkungen von Sprungtraining bei Fußballspielern untersuchen, alle Sprünge mit einer Bodenkontaktzeit > 250 ms aus. Dieser Empfehlung folgend werden in der vorliegenden Studie ebenfalls 250 ms als Grenzwert für einen gültigen Sprung festgelegt. Wenn mehrere Sprünge dieses Kriterium erfüllen wird der Sprung mit dem größten Reaktivitätsindex festgehalten. Außerdem wird zusätzlich der absolut höchste Sprung, der die DJ Kriterien erfüllt, notiert.

Der Sprung läuft folgendermaßen ab: Der Proband steht mit in die Hüfte gestützten Armen auf der Erhöhung. Durch Vorschwingen eines beliebigen Beines wird der Sprung initiiert. Die Erhöhung wird verlassen, der Proband lässt sich auf die Platte fallen und landet mit beiden Füßen gleichzeitig auf der Platte. Hierbei ist es bedeutsam, dass der Untersucher darauf achtet, dass der Sportler nicht durch einen Sprung von der Erhöhung auf die Platte gelangt, sondern sich fallen lässt. Diese Ausführung ist aus zwei Gründen bedeutsam. Erstens würde durch einen Absprung die Fallhöhe verändert werden und zweitens würde durch die Kontraktion der Wadenmuskulatur beim Absprung von der Stufe der Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (DVZ) beim eigentlichen Sprung auf der Platte beeinflusst werden.

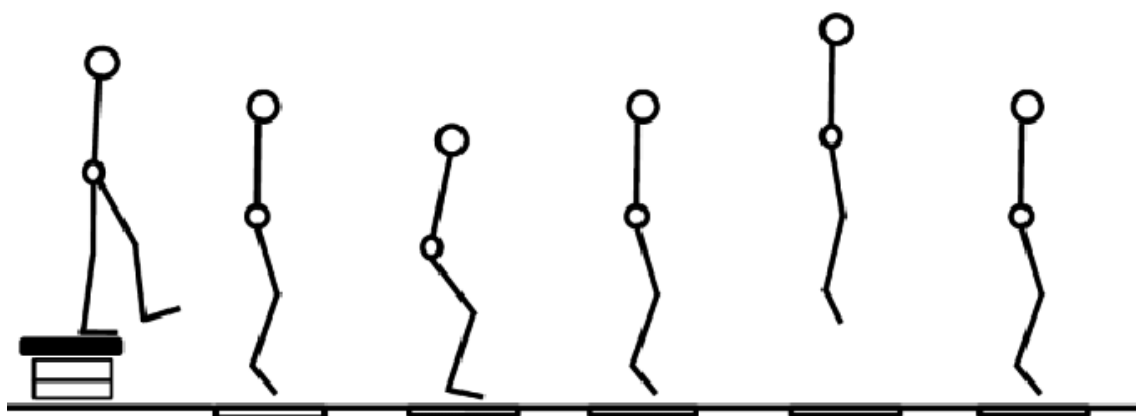


Abb.5: Schematischer Ablauf eines Drop Jumps aus Richter, 2011 (Richter 2011), mit Genehmigung von Dr. Anne Focke (ehemals Richter)

4.8 Dehnintervention

Nach der Eingangsuntersuchung werden die Probanden, die der Interventionsgruppe zugeordnet sind, durch den Doktoranden praktisch in das PNF-Trainingsprogramm zur Dehnung der Wadenmuskulatur eingewiesen.

Im Anschluss wird das Programm selbstständig mit Assistenz der Trainer und Physiotherapeuten durchgeführt.

Ziel dieses Dehnprogramms ist es, einen möglichst guten Dehneffekt bezogen auf die ROM im OSG zu erzielen, ohne dabei zu sehr in die eingespielten Abläufe einzugreifen. Aus diesem Grund wird ein Dehnprogramm durchgeführt, welches ohne zusätzliches Equipment, ohne einen Partner und mit geringem Zeitaufwand in das normale individuelle oder vom Verein vorgegebene Training und die Wettkampfabläufe integriert werden kann. Durch diesen Ansatz wird Compliance-Problemen vorgebeugt.

Die Spieler befinden sich in einer klassischen Wadendehnungsposition an einer Wand oder an dem, den Fußballplatz umgebenden Geländer. In einer vornübergebeugten Position stützen sich die Spieler mit beiden Händen am Geländer oder einer Wand ca. auf Bauchnabelhöhe ab. Das zu dehnende Bein ist vollständig gestreckt und die Ferse befindet sich auf dem Boden, während die Fußspitze in einer Linie mit dem Unterschenkel ausgerichtet wird. Bedingt durch den biartikulären Verlauf des M. gastrocnemius wird nur bei gestrecktem Kniegelenk wirksam die gesamte Einheit der Wadenmuskulatur gedehnt. Bei leichter Anwinklung des zu dehnenden Beines, wäre der M. gastrocnemius entspannt und folglich würde nur der M. soleus gedehnt werden. Das kontralaterale Bein ist angewinkelt und steht entspannt auf dem Boden.

Die Dehnintervention wird nach dem Vorbild von Mahieu et al. in Form eines modifizierten CR AC Stretching-Programms durchgeführt (Mahieu, Cools et al. 2009). Die Wahl fiel auf dieses Programm, da es selbstständig und ohne weitere Hilfsmittel durchführbar ist und sich zudem bereits als wirksam für die Dehnung des M. gastrocnemius erwiesen hat. Die Probanden werden instruiert, dass die Dehnung bis kurz vor den Punkt des Unbehagens durchgeführt werden soll.

Der Ablauf umfasst drei Abschnitte:

1. Es wird für 15 sec. eine statische Dehnung der Wadenmuskulatur durchgeführt.

2. Direkt im Anschluss wird in der gleichen Position für 6 sec eine isometrische Kontraktion der Wadenmuskulatur mit einem in den Boden weisenden Kraftvektor durchgeführt.
3. Im Anschluss wird eine dynamische Kontraktion der Dorsalextensoren für 15 sec. ausgeführt, um die Wadenmuskulatur in eine neue Position zu bringen und letztlich einen zusätzlichen Dehneffekt zu erzielen.

Dieser Ablauf wird 5-mal wiederholt und wird von 20-sec-Pausen unterbrochen. Die Zeitintervalle werden von den Probanden selbstständig durch Zählen gemessen. In Bezug auf die isometrische Kontraktion werden die Probanden instruiert 100% Krafteinsatz aufzubringen. In der Literatur wird dies als MVIC (=maximum voluntary isometric contraction) bezeichnet.

Der normale Trainingsplan der Mannschaften umfasst in der Regel 4-5 Trainingseinheiten und ein Spiel pro Woche, allerdings streicht der Trainer abhängig von Spielergebnissen und Belastungszustand seiner Spieler von Zeit zu Zeit Trainingseinheiten bzw. setzt zusätzliche Trainingseinheiten an. Die Spieler haben die erlernte Dehnung wie oben beschrieben, in ihr bisheriges Trainingsprogramm und die Spiele integriert- insofern werden die Dehnübungen im Schnitt 4-5 Mal pro Woche durchgeführt. Die Probanden der IG sind instruiert am Tag der Abschlussuntersuchung keine Dehnintervention durchzuführen.

4.9 Statistik

Die statistische Auswertung der Daten erfolgt mit Hilfe des Programms GraphPad Prism Version 8. Es werden drei verschiedene Tests angewandt: Chi Quadrat Test, gepaarter Wilcoxon Test und ungepaarter Wilcoxon Test (=Mann Whitney Test). Der Chi Quadrat Test dient dem Vergleich von Proportionen. Der gepaarte Wilcoxon Test wird für die Signifikanzprüfung der prä-und postinterventionellen Werte innerhalb der KG/IG angewandt. Der ungepaarte Wilcoxon Test (= Mann Whitney Test) dient dem Vergleich der Werte zwischen KG und IG. Die aufgestellten Aussagen und Graphen basieren auf den Medianen, da der Wilcoxon Test auf dem Vergleich von Medianen beruht. Das Signifikanzniveau der p-Werte wird bei 0,05 festgelegt. Die statistische Auswertung wurde durch das Institut für medizinische Bioinformatik und Biostatistik der Universität Marburg geprüft und die Auswahl der Tests sowie deren Anwendung auf die erhobenen Daten als korrekt eingestuft.

5. Ergebnisse

5.1 Deskriptive Statistik

Die hier ausgewertete Studie wurde an der Universitätsklinik für Orthopädie der Philipps Universität Marburg durchgeführt. Für diese Studie wurden 41 Probanden (Gruppe mit Dehnintervention: n=22; Gruppe ohne Dehnintervention: n=19) untersucht. Die Gruppe mit Dehnintervention wird als Interventionsgruppe (=IG), die Gruppe ohne Dehnintervention wird als Kontrollgruppe (=KG) bezeichnet. Bei insgesamt 3 Probanden war eine Durchführung der Nachuntersuchung nicht möglich. Innerhalb der Kontrollgruppe war das in einem Fall bedingt durch eine längere berufsbedingte Abwesenheit zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung und im anderen Fall aufgrund einer Meniskusruptur im Interventionszeitraum. Zudem wurden von einem Probanden die Pedobarographiedaten im Zuge der Nachuntersuchung wegen eines technischen Fehlers nicht aufgezeichnet. In der Interventionsgruppe kam es zu einem verletzungsbedingten Ausfall, aufgrund eines Mittelfußbruchs während des Interventionszeitraums. Für die Nachuntersuchung standen somit auf Kontrollgruppenseite n=17 (n=16 Pedobarographie Datensätze) und auf Interventionsgruppenseite n=21 Probanden zur Verfügung. Die Kontrollgruppe absolvierte im Interventionszeitraum 34 Einheiten. Der Mittelwert der Trainingsbeteiligung liegt bei 30,41 Einheiten. Ein Proband liegt mit 17 Einheiten bei einer 50%igen Beteiligung. Die weiteren Probanden wiesen eine Beteiligung von ≥ 25 Einheiten auf. Somit weisen alle in die Studie eingeschlossenen Probanden der Kontrollgruppe, die sowohl für die Erst- als auch die Zweituntersuchung zur Verfügung standen, die im Material und Methodenteil unter Studiendesign formulierte Mindestbeteiligung von durchschnittlich 2 Trainingseinheiten pro Woche auf. Die Interventionsgruppe absolvierte im Interventionszeitraum 41 Einheiten mit einer durchschnittlichen Beteiligung von 33,94 Einheiten. Ein Proband erreicht die Mindestbeteiligung von 16 Einheiten nicht.

Somit ergibt sich bei der Kontrollgruppe eine Anzahl von n=17 Probanden, die für Eingangs- und Abschlussuntersuchung zur Verfügung standen und die Mindestanzahl an erforderlichen Trainingseinheiten aufwiesen. Bei der Interventionsgruppe gilt dies für n=20 Probanden.

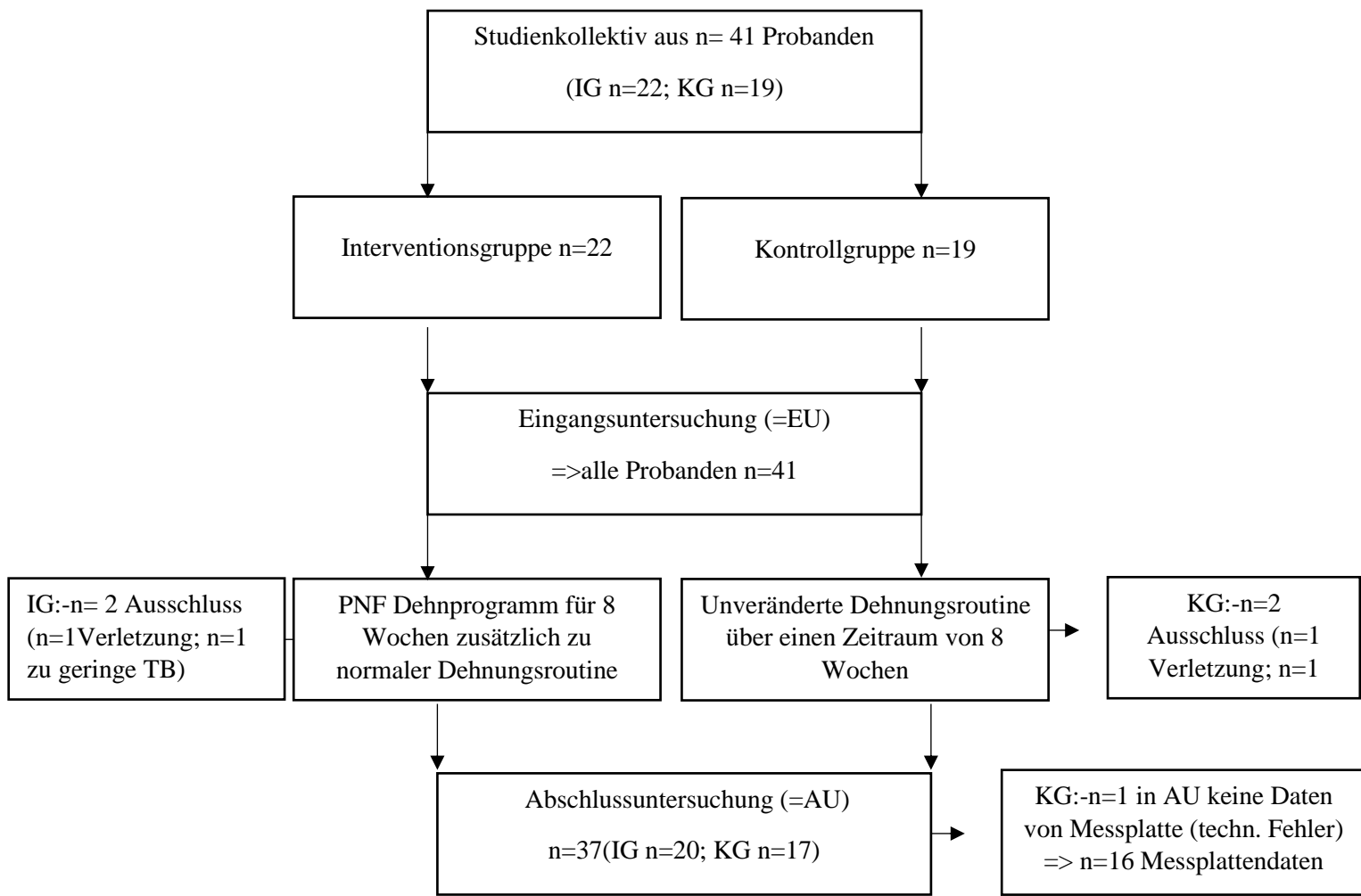


Abbildung 9.: Dargestellt sind der Studienablauf und die Entwicklung der Studienkollektivteilnehmerzahlen

Tabelle 1: Stichprobencharakteristik (Gesamt n=41, Kontrollgruppe n=19, Interventionsgruppe n=22) bezüglich Alter in Jahren, Größe in Metern, Gewicht in kg, BMI in kg/m², Spieldauer in Jahren, Trainingsbeteiligung in Wochen, MW=Mittelwert; SD=Standardabweichung; Min=Minimum; Max=Maximum, p-Wert

	KG	IG	Gesamt	KG	IG	Gesamt	KG	IG	Gesamt	KG	IG	Gesamt	KG	IG	Gesamt
	MW			Median			SD			MIN			MAX		
Alter	20,11	24,18	22,29	20	24	21	1,65	3,04	3,22	18	20	18	23	29	29
Größe	1,80	1,83	1,81	1,8	1,84	1,8	0,05	0,06	0,06	1,73	1,7	1,7	1,88	1,96	1,96
Gewicht	75,23	78,96	77,23	74,5	77,5	75,8	5,02	8,74	7,49	68	68	68	88	96	96
BMI	23,21	23,65	23,45	23,16	23,1	23,08	1,43	1,58	1,53	21,22	21,6	21,22	25,99	26,59	26,59
Spieldauer	15	18,68	16,98	14	18,5	16	2,12	3,62	3,54	13	9	9	19	24	24
Trainingsbeteiligung	30,41	33,9	32,34	32	37	33	4,03	8,56	7,13	17	6	6	34	41	41

Das Alter der Kontrollgruppe liegt durchschnittlich 3,07 Jahre unter dem Alter der Interventionsgruppe. Die Interventionsgruppe spielt durchschnittlich 3,68 Jahre länger Fußball, ist durchschnittlich 3 cm größer und 3,73 kg schwerer als die Kontrollgruppe. Der Wert des BMI der Interventionsgruppe ist ebenfalls etwas höher als der der Kontrollgruppe. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Interventionsgruppe im Durchschnitt älter, größer, schwerer und länger im Spielbetrieb ist. Da es sich bei der Kontrollgruppe um eine U23 (unter 23 Jahre) Mannschaft handelt, die als Bindeglied zwischen Junioren- und Seniorenspielbetrieb fungiert und die erste Mannschaft (= Interventionsgruppe) aus Spielern aller Alterskategorien besteht, sind die aufgeführten Unterschiede auf die unterschiedlichen Mannschaftskonzepte zurückzuführen.

5.2 Prüfung der Annahmen 1-5

Es erfolgt die Prüfung der Annahmen 1-5. Im Anschluss wird anhand der Ergebnisse der einzelnen Annahmen zusammenfassend die Kernfrage beantwortet.

5.2.1 Annahme Nr. 1: Fußballspieler haben eine verkürzte Wadenmuskulatur.

Die Prüfung dieser Annahme erfolgt über den präinterventionellen Wert der ROM im OSG (Silfverskiöld Test). Die formulierte Annahme ist unabhängig von der in der

vorliegenden Studie durchgeführten Dehnintervention. Es interessiert lediglich, ob grundsätzlich bei Fußballspielern eine Verkürzung der Wadenmuskulatur vorliegt. Aus diesem Grund werden die präinterventionellen Werte von KG und IG herangezogen. In der vorliegenden Studie ist die ROM definiert als die Differenz der Gradzahlen der Ausgangsstellung (90° zwischen Fußsohle und Unterschenkel) und der Endstellung bei Kraftapplikation auf die Fußsohle durch den Untersucher. Dies entspricht dem Messverfahren von DiGiovanni et al. Die Definition einer IGC von Barouk et al. (Def.: Eine Differenz von $>13^\circ$ zwischen Ausgangsstellung und Endstellung wird als IGC gewertet.) ist aufgrund der unterschiedlichen Definition des Startpunktes beim Messen der ROM im OSG nicht auf die Daten der vorliegenden Studie anwendbar.

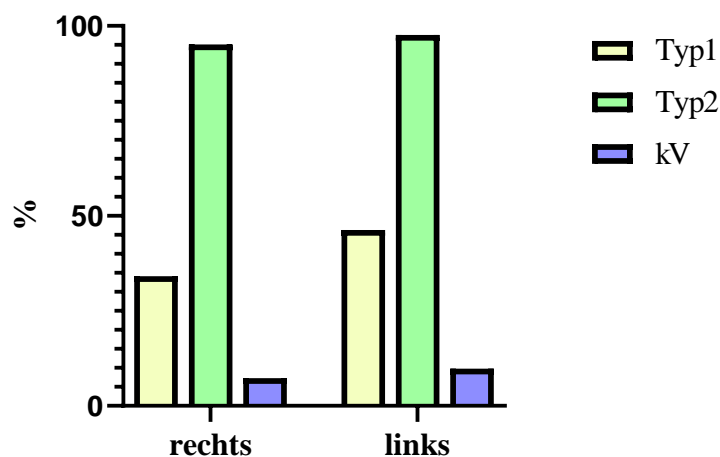
DiGiovanni et al. schlagen zwei mögliche Zahlenwerte für die Definition einer IGC vor. Außerdem wird ein weiterer Wert genannt, der eine komplexe Verkürzung definiert. Typ1 definiert eine IGC ab einer Dorsalextensionsfähigkeit des OSG in Extensionsstellung des Kniegelenks von $\leq 5^\circ$, Typ 2 ab $\leq 10^\circ$. Eine komplexe Verkürzung der Wadenmuskulatur liegt DiGiovanni et al. zufolge bei Werten $\leq 10^\circ$ der Dorsalextensionsfähigkeit des OSG in Flexionsstellung des Kniegelenks vor. Diese Schwellenwerte wurden auf die, mit dem Silfverskiöld Test erhobenen Werte, der vorliegenden Studie angewandt und die absolute Anzahl bzw. der prozentuale Anteil an Probanden, auf die diese Definition zutrifft, notiert.

Tabelle 2: Absolute Anzahl und Anteil der Probanden mit einer IGC und einer komplexen Verkürzung der Wadenmuskulatur nach Definitionen von DiGiovanni et al. aus „Isolated gastrocnemius tightness“:

IGC Typ 1: Dorsalextension $\leq 5^\circ$ in Extensionsstellung; IGC Typ 2: Dorsalextension $\leq 10^\circ$ in Extensionsstellung; komplexe Verkürzung (=kV): Dorsalextension $\leq 10^\circ$ in Flexionsstellung; KG n=19, IG n= 22, Gesamt n=41

	re präinterventionell n/%			li präinterventionell n/%		
	Typ1	Typ2	kV	Typ1	Typ2	kV
KG	5/26,3	17/89,5	0/0	8/42,1	18/94,7	0/0
IG	9/40,9	22/100	3/13,6	11/50	22/100	4/18,2
Gesamt	14/34,1	39/95,1	3/7,3	19/46,3	40/97,6	4/9,8

Gesamtkollektiv: Vorliegen von IGC Typ1/Typ2 und kV



Graphik 1: Anteil der Probanden des gesamten Studienkollektivs mit einer IGC und einer komplexen Verkürzung der Wadenmuskulatur nach Definitionen von DiGiovanni et al. aus „Isolated gastrocnemius tightness“:

IGC Typ 1: Dorsalextension $\leq 5^\circ$ in Extensionsstellung; IGC Typ 2: Dorsalextension $\leq 10^\circ$ in Extensionsstellung; komplexe Verkürzung (=kV): Dorsalextension $\leq 10^\circ$ in Flexionsstellung; KG n=19, IG n= 22, Gesamt n=41

Anhand der Graphen wird deutlich, wie gravierend die Unterschiede der einzelnen Definitionen sind. Der Anteil an Probanden, der zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung eine IGC aufweist, ist stark abhängig von der jeweils angewandten Definition. Bei Anwendung der moderateren Definition Typ 1 weisen auf der rechten Seite 34,1% und auf der linken Seite 46,3% aller Probanden eine IGC auf. Bei Anwendung der strengeren Definition Typ 2 liegt auf der rechten Seite bei 95,1% und auf der linken Seite bei 97,6% eine IGC vor. Eine komplexe Verkürzung liegt bei deutlich weniger Probanden vor: auf der rechten Seite bei 7,3% der Probanden und auf der linken Seite bei 9,8%.

Abschließend lässt sich festhalten, dass Annahme 1 in Bezug auf eine IGC bestätigt werden kann. Unter Anwendung der Definitionen von DiGiovanni et al. kann Annahme 1 bei Anwendung von Definition Typ 1 sicher bestätigt werden, da >95% des gesamten Kollektivs diese Definition auf der rechten und linken Seite erfüllt. Bei Anwendung von

Definition Typ 2 ist dies nicht ganz so deutlich. Dennoch weisen unter Anwendung von Definition Typ 2 mehr als ein Drittel der Probanden auf der rechten und linken Seite eine IGC auf. Komplexe Verkürzungen der Wadenmuskulatur liegen bei <10% der Probanden vor.

5.2.2 Annahme Nr. 2: Ein achtwöchiges PNF Dehnprogramm bewirkt eine Vergrößerung der ROM im OSG bei Fußballspielern.

Diese Annahme wird geprüft durch den Vergleich der prä- und postinterventionellen Werte der IG und der KG.

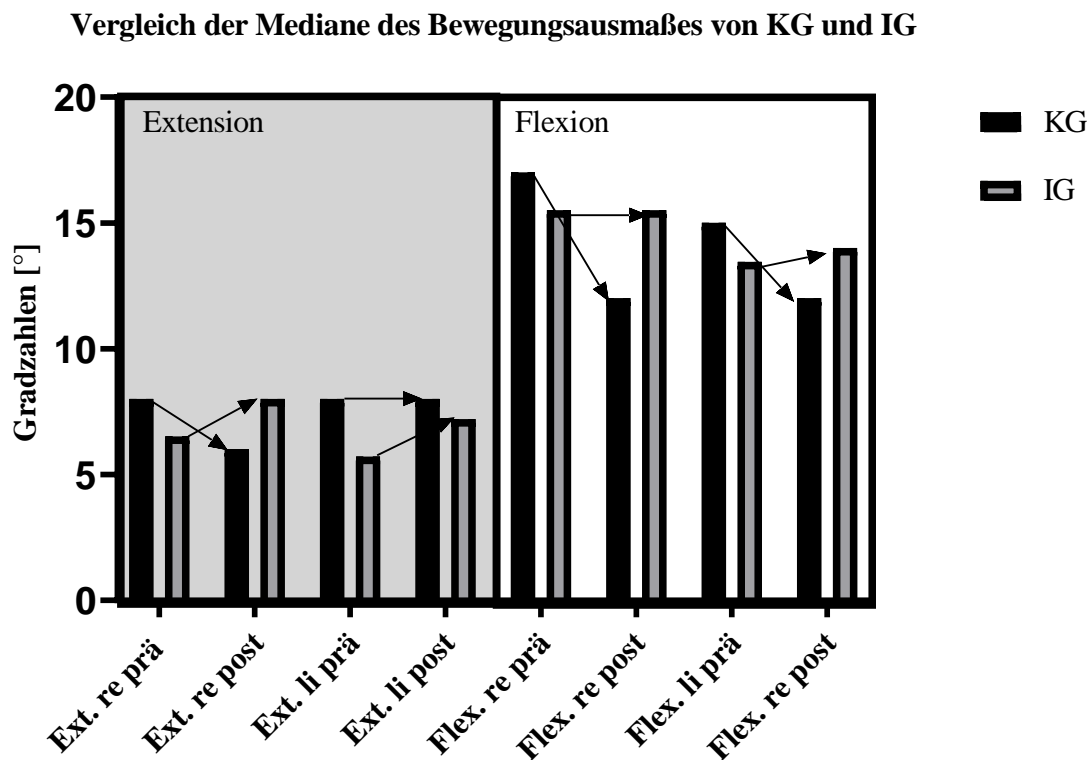
Die Mediane der ROM der KG sind präinterventionell in Extensionsstellung rechts um 1,5° und links um 2° größer als die Mediane der IG. In Flexionsstellung liegen die Mediane der KG rechts und links 1,5° über den Werten der IG. Die p-Werte der durchgeführten Vergleiche weisen keine statistische Signifikanz auf.

Die Mediane des Bewegungsausmaßes der KG sind nach dem achtwöchigen Interventionszeitraum in Extensionsstellung rechts um 2° kleiner als bei der Erstuntersuchung. In Flexionsstellung kommt es rechts und links zu einer Abnahme der Mediane von 3°. Einzige Ausnahme stellt das linke OSG in Extensionsstellung dar. Hier kam es zu keiner Veränderung der prä- und postinterventionellen Werte. In Extensionsstellung konnte auf der rechten und linken Seite kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen prä- und postinterventionellen Werten festgestellt werden. Die Abnahme der ROM in Flexionsstellung weist auf der rechten ($p=0,0001$) und auf der linken Seite ($p=0,0042$) statistisch signifikante Werte auf.

Die Mediane der ROM der IG nehmen innerhalb des achtwöchigen Interventionszeitraum in Extensionsstellung rechts um 1,5° und links um 2° zu. In Flexionsstellung nimmt die ROM auf der linken Seite um 2° zu. Beim rechten Sprunggelenk kommt es in Flexionsstellung zu keiner Veränderung der Mediane. Eine statistische signifikante Zunahme der ROM liegt auf der linken Seite in Extensionsstellung vor ($p=0,0329$).

Die Zunahme der Beweglichkeit der IG bzw. die Abnahme der Beweglichkeit der KG erfolgte zu einem solchen Ausmaß, dass es zu einer Umkehr der Verhältnismäßigkeiten der ROM im Vergleich zur Erstuntersuchung kam. Waren präinterventionell noch alle Werte der KG größer als die der IG, kehren sich diese Verhältnismäßigkeiten

postinterventionell um. Einzige Ausnahme bildet das linke Bein in Extensionsstellung. Hier weist auch postinterventionell die KG noch eine größere ROM auf als die IG. Ein statistisch signifikanter Unterschied liegt bei dem Vergleich der Mediane des linken Beins in Flexionsstellung vor ($p = 0,0339$). Die weiteren durchgeführten Vergleiche weisen keine statistische Signifikanz auf.



Graphik 2: Aufgeführt sind die Mediane der ROM der Kontrollgruppe ($n=17$) und Interventionsgruppe ($n=20$) gemessen in Grad $^{\circ}$ des re/li OSG bei gestrecktem (grau unterlegt) und 90° flektiertem Kniegelenk prä- und postinterventionell, die schwarzen Balken geben die Werte der KG wider, die grau gefüllten Balken geben die Werte der IG wieder, die Pfeile verdeutlichen den Trend zwischen Eingangsuntersuchung und Abschlussuntersuchung

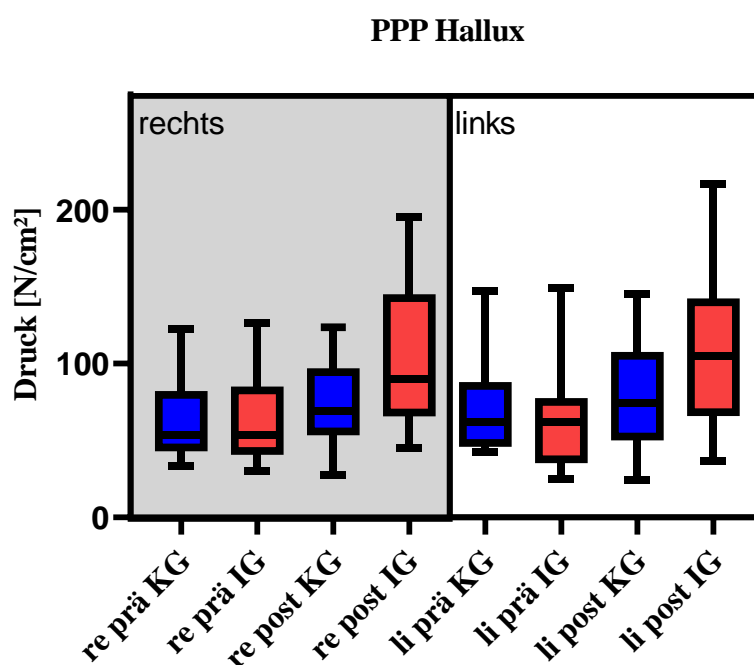
Aufgrund der in der vorliegenden Studie erhobenen Messwerte kann die eingangs formulierter Annahme, dass ein achtwöchiges PNF Dehnprogramm eine Vergrößerung der ROM im OSG bewirkt bestätigt werden. Die Ergebnisse der ROM in der KG deuten darauf hin, dass ohne ein gezieltes Wadendehnungsprogramm eine Reduktion der Beweglichkeit im Saisonverlauf auftritt.

5.2.3 Annahme Nr.3: Die Vorfußbelastung wird mit zunehmender Dehnung der Wadenmuskulatur reduziert.

Die Ergebnisse von Annahme Nr. 2 zeigen, dass ein achtwöchiges PNF- Dehnprogramm eine Vergrößerung der ROM im OSG bewirkt und somit eine Zunahme der Dehnbarkeit der Wadenmuskulatur erzielt werden konnte. Folglich stellt sich die Frage, ob sich diese Zunahme der ROM im Belastungsprofil, der Schmerzangabe und Beschwielung der Fußsohle widerspiegelt. Zur Prüfung des Belastungsprofils werden die mittels dynamischer Pedobarographie aufgezeichneten Parameter Peak Plantar Pressure (PPP), Kontaktzeiten und Kraft-Zeit-Integrale von einzelnen anatomischen Bereichen ausgewertet. Die ausgewerteten anatomischen Bereiche sind Hallux, Vorfuß und Ferse.

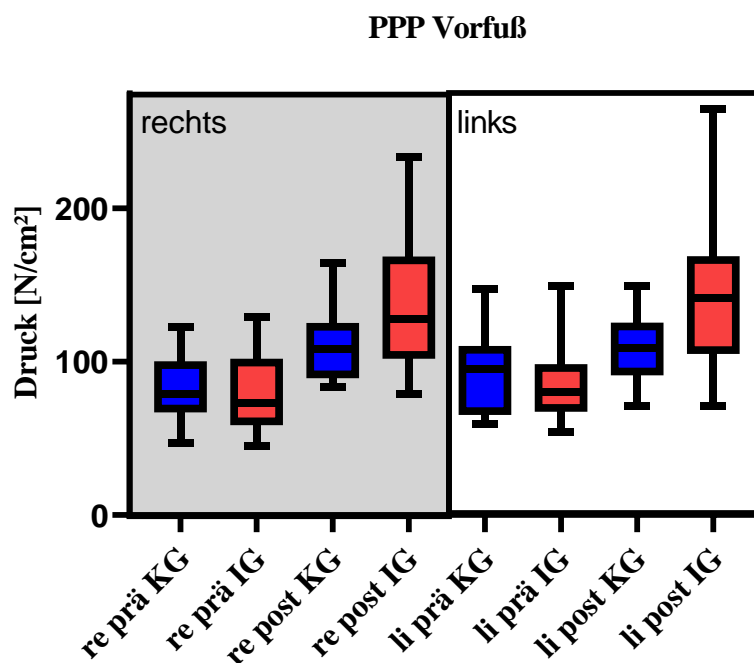
Neben der pedobarographischen Auswertung, werden die prä- und postinterventionellen Werte der Parameter Vorfußbeschwielung und Schmerzangaben im Vorfußbereich zur Beurteilung der Vorfußbelastung verglichen.

5.2.3.1 Peak Plantar Pressure: [N/cm²]



Graphik 3: Vergleich der PPP Hallux [N/cm²] der KG (n=16) und IG (n=20) prä- und postinterventionell, der obere/untere Whisker gibt den Min/Max Wert an, die Box umfasst die mittleren zwei Quartile und den Median, die Boxplots der KG sind blau, die der IG rot ausgefüllt

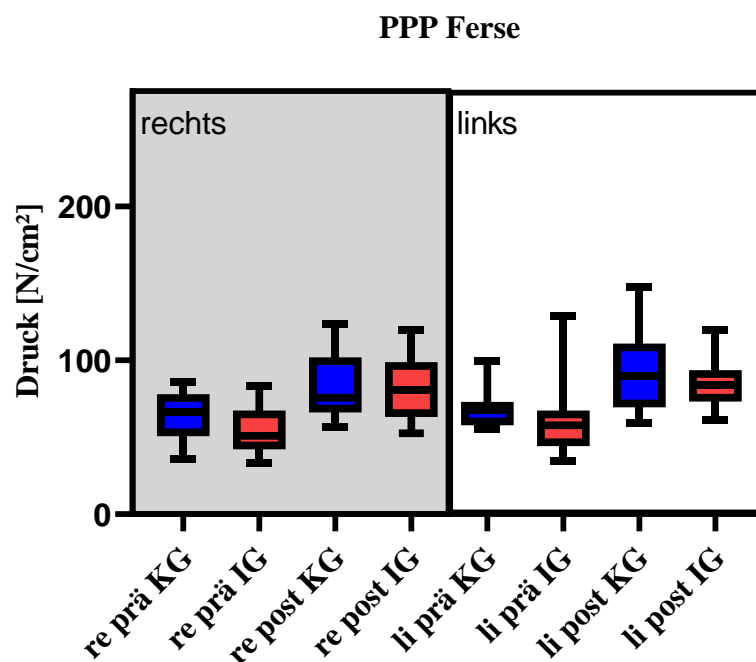
Sowohl die Mediane als auch die Streubreite der Werte der maximalen Großzehendrücke nehmen sowohl in der KG als auch in der IG zu. Während sich die Werte präinterventionell noch auf einem ähnlichen Niveau befinden, sind die postinterventionellen Werte der IG deutlich höher. Die Zunahme der Mediane der IG ist auf der rechten ($p = <0,0001$) und linken ($p = 0,0001$) Seite statistisch signifikant. Die Zunahme der Werte in der KG ist statistisch nicht signifikant (rechts: $p = 0,2522$; links: $p = 0,4637$). Die in der Graphik deutliche Zunahme der Werte der IG führt aufgrund der gleichzeitigen Zunahme auf KG Seite dazu, dass kein statistisch signifikanter Unterschied postinterventionell zwischen beiden Gruppen besteht (rechts $p = 0,0575$, links $p = 0,0771$).



Graphik 4: Vergleich PPP Vorfuß der KG (n=16) und IG (n=20) prä- und postinterventionell, der obere/untere Whisker gibt den Min/Max Wert an, die Box umfasst die mittleren zwei Quartile und den als Balken markierten Median. Die Boxplots der KG sind blau, die der IG sind rot ausgefüllt.

Die Mediane der präinterventionellen Werte des Vorfußes auf der rechten und linken Seite unterscheiden sich zwischen KG und IG präinterventionell nur gering und weisen keine statistisch signifikanten Unterschiede auf. Die Zunahme in der IG ist etwas ausgeprägter als die der KG. In der IG kommt es zu einem signifikanten Anstieg der

Druckwerte auf der rechten und linken Seite (rechts: $p = <0,0001$; links: $p = <0,0001$). Die Zunahme in der KG ist auf beiden Seiten statistisch signifikant (rechts: $p = 0,0017$; links: $p = 0,0131$). Die Mediane beider Gruppen sind postinterventionell deutlich höher als präinterventionell. Die Werte der IG sind auf der rechten Seite postinterventionell statistisch signifikant größer als die Werte der KG ($p = 0,0256$), auf der linken Seite ist dies nicht der Fall ($p = 0,8381$).



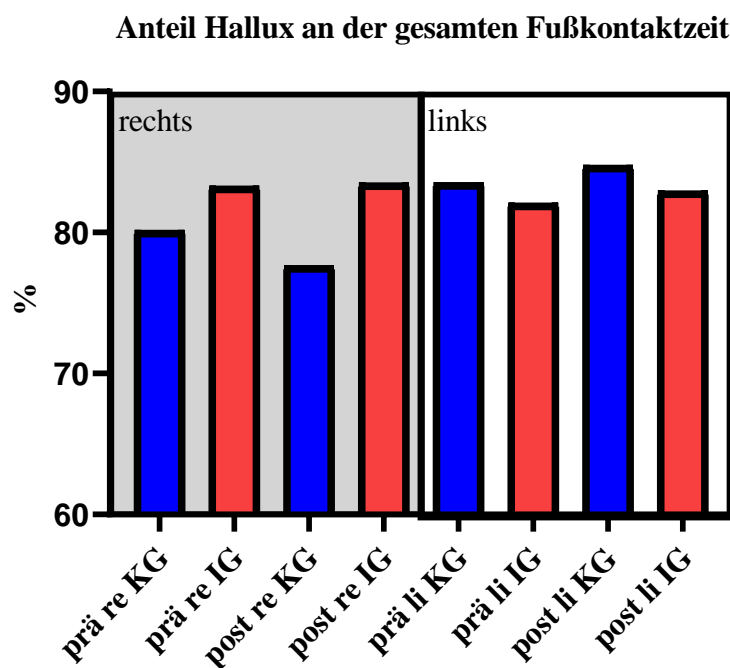
Graphik 5: Vergleich PPP Ferse der KG (n=16) und IG (n=20) prä- und postinterventionell, der obere/untere Whisker gibt den Min/Max Wert an, die Box umfasst die mittleren zwei Quartile und den Median, die Boxplots der KG sind blau, die der IG rot ausgefüllt

Die Werte der KG sind auf beiden Seiten präinterventionell statistisch signifikant größer als die der IG. Die Werte der maximalen Fersendrucke nehmen in beiden Gruppen zu, wobei sowohl die Ausgangswerte als auch die Endwerte der KG größer sind als die der IG. Die Zunahme der Werte ist innerhalb der beiden Gruppen jeweils statistisch signifikant (KG: rechts: $p = 0,0017$; links: $p = <0,0001$; IG: rechts: $p = <0,0001$; links: $p = <0,0001$). Der Vergleich der postinterventionellen Werte beider Gruppen miteinander weist keine statistisch signifikanten Werte auf. Auffällig ist, dass die Streubreite der Werte sowohl prä- als auch postinterventionell in beiden Gruppen deutlich geringer ist als in den sonstigen anatomischen Bereichen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es in beiden Gruppen in allen beleuchteten anatomischen Bereichen zu einer Zunahme der maximalen Druckwerte prä- im Vergleich zu postinterventionell gekommen ist. Im Hallux/Vorfußbereich ist die Zunahme der Werte der IG jeweils deutlich größer als die Zunahme der Werte der KG. Im Fersenbereich zeigen die Werte der IG einen geringeren Anstieg als in den anderen anatomischen Bereichen. Die prä- und postinterventionellen Werte der IG liegen unter denen der KG.

5.2.3.2 Bodenkontaktzeiten einzelner anatomischer Bereiche

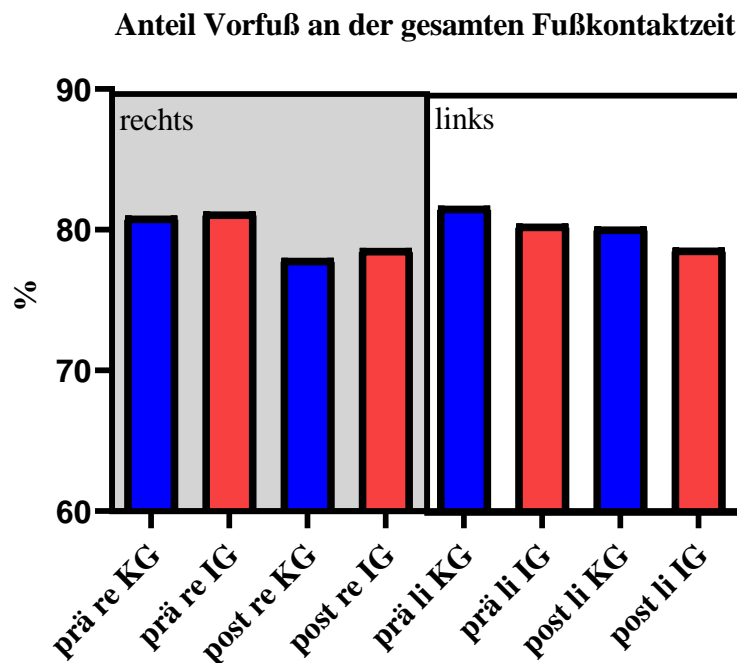
Für die Auswertung der Bodenkontaktzeit wurde die Kontaktzeit der einzelnen anatomischen Bereiche durch die Bodenkontaktzeit des gesamten Schrittes dividiert und der Anteil folglich in Prozent angegeben.



Graphik 6 : Vergleich der Mediane des prozentualen Anteils der Großzehenkontaktzeit an der gesamten Bodenkontaktzeit; die Balken der KG sind blau, die Balken der IG sind rot gefärbt, Kontrollgruppe (n=16) und der Interventionsgruppe (n=20) prä- und

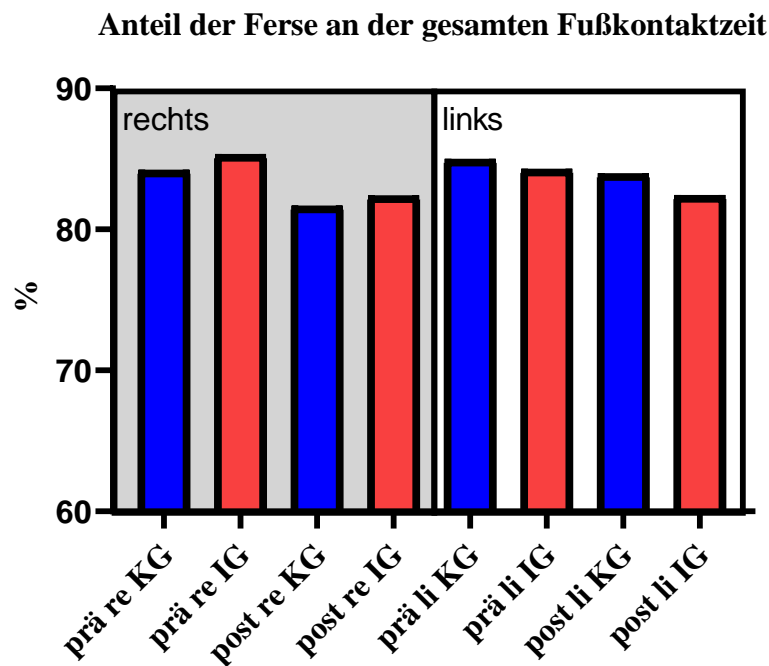
Der Anteil der Großzehenkontaktzeit an der gesamten Kontaktzeit nimmt in der KG auf der rechten Seite ab und auf der linken Seite zu. Die Zu- bzw. Abnahme ist statistisch nicht signifikant. Die Werte der IG bleiben auf beiden Seiten prä- und

postinterventionell nahezu unverändert und weisen dementsprechend keinen statistisch signifikanten Unterschied auf (rechts: $p=0,8695$; links: $p=0,8124$). Der Vergleich beider Gruppen miteinander weist sowohl prä- als auch postinterventionell keinen statistisch signifikanten Unterschied auf (rechts: $p=0,0667$; links: $p=0,8381$).



Graphik 7: Vergleich der Mediane des prozentualen Anteils der Vorfußkontaktzeit an der gesamten Bodenkontaktzeit; die Balken der KG sind blau, die Balken der IG sind rot gefärbt, Kontrollgruppe (n=16) und der Interventionsgruppe (n=20) prä- und postinterventionell

Der Anteil der Vorfußbelastungszeiten nimmt sowohl in der KG als auch in der IG im Vergleich prä- zu postinterventionell ab. Diese Beobachtung gilt für die rechte- und die linke Seite. In beiden Gruppen ist diese Abnahme von statistisch nicht signifikantem Ausmaß (KG: rechts: $p=0,1928$; links: $p=0,2744$); IG: rechts: $p=0,1799$; links: $p=0,0637$). Auch der Vergleich beider Gruppen miteinander liefert keine statistisch signifikanten Unterschiede.



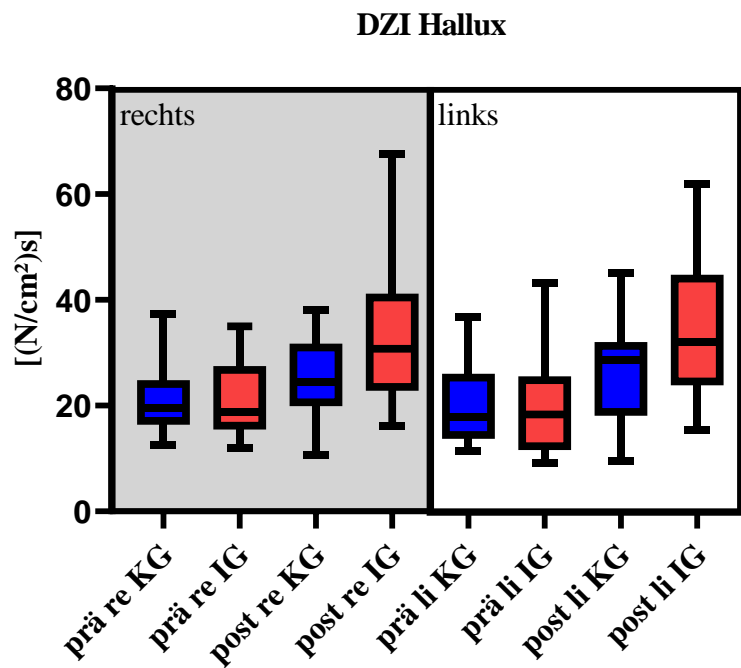
Graphik 8: Vergleich der Mediane des prozentualen Anteils der Fersenkontaktzeit an der gesamten Bodenkontaktzeit; die Balken der KG sind blau, die Balken der IG sind rot gefärbt, Kontrollgruppe (n=16) und der Interventionsgruppe (n=20) prä- und postinterventionell

Der Anteil der Fersenkontaktzeit an der gesamten Fußkontaktzeit nimmt in beiden Gruppen auf beiden Seiten ab. Die Vergleiche der Werte beider Gruppen miteinander sind sowohl prä- als auch postinterventionell nicht signifikant. Die Abnahme auf der linken Seite in der IG weist ein statistisch signifikantes Ausmaß auf ($p=0,0083$).

Der Annahme entsprechend, dass ein Wadendehnungsprogramm zu einer Reduktion der Vorfußbelastung führt, kommt es in der IG zu einer Abnahme des Anteils der Vorfußbelastungszeit. Entgegen der Erwartungen kam es im Fersenbereich ebenfalls in beiden Gruppen zu einer Abnahme des Anteils der Belastungszeit.

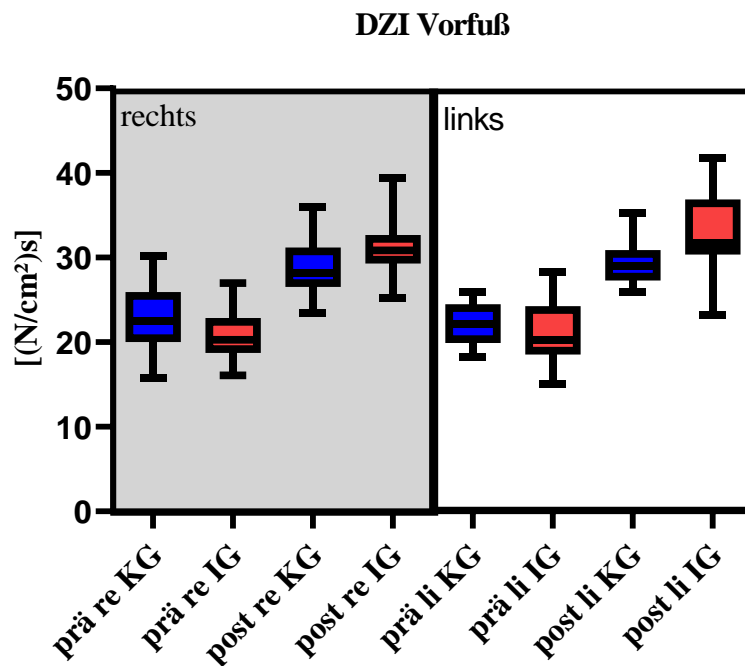
5.2.3.3 Druckzeitintegral

Dieser Parameter ergibt sich durch die Fläche unter der Druckzeitkurve. Den Beginn markiert die Aktivierung eines Sensors im vordefinierten anatomischen Bereich. Das Ende wird definiert durch den Moment, ab dem keine Aktivierung eines Sensors mehr innerhalb des jeweiligen anatomischen Bereichs erfolgt. Das DZI gibt den Kumulativdruck der einzelnen anatomischen Bereiche während eines Schritts an.



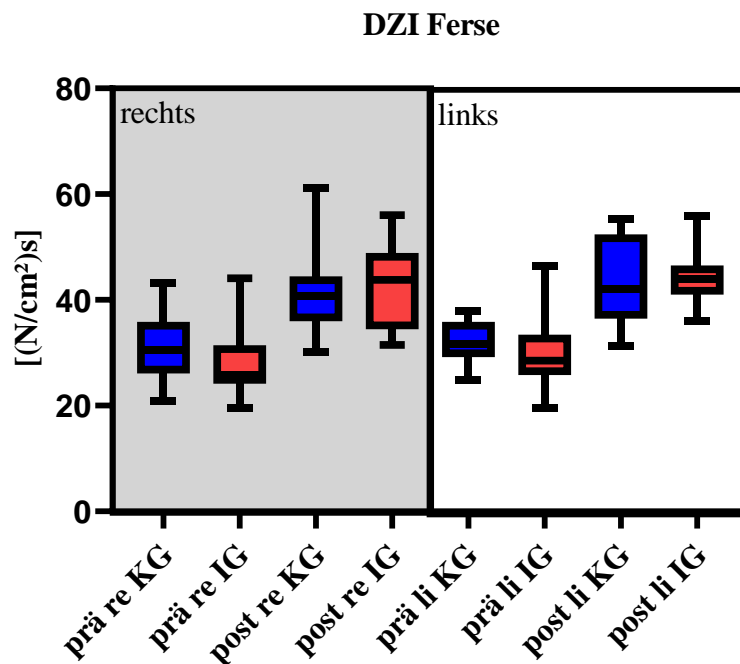
Graphik 9: Vergleich DZI Hallux, der obere/untere Whisker gibt den Min/Max Wert an, die Box umfasst die mittleren zwei Quartile und den Median, die Boxplots der KG sind blau, die der IG rot ausgefüllt, Kontrollgruppe (n=16) und der Interventionsgruppe (n=20) prä- und postinterventionell

Die Druckzeitintegrale der Großzehe der IG zeigen eine Zunahme auf der rechten und linken Seite. Die Zunahme gilt in Bezug auf den Median, die Streubreite der Werte und die maximal gemessenen Werte. Die Zunahme der Werte ist auf beiden Seiten statistisch signifikant (rechts und links $p < 0,0001$). In der KG ist ebenfalls eine Zunahme der Werte zu beobachten, die deutlich geringer ausfällt als in der IG. Auf der linken Seite liegt eine signifikante Zunahme vor ($p = 0,0182$). Auf der rechten Seite ist die Zunahme statistisch nicht signifikant. Der postinterventionelle Unterschied zwischen beiden Gruppen ist nur auf der rechten Seite statistisch signifikant ($p = 0,0017$).



Graphik 10: DZI Vorfuß, der obere/untere Whisker gibt den Min/Max Wert an, die Box umfasst die mittleren zwei Quartile und den Median, die Boxplots der KG sind blau, die der IG rot ausgefüllt, Kontrollgruppe (n=16) und der Interventionsgruppe (n=20) prä- und postinterventionell

Die Druckzeitintegrale des Vorfußes der IG zeigen eine Zunahme der Werte auf der rechten und linken Seite. Die Zunahme gilt in Bezug auf den Median, die Streubreite der Werte und die maximal gemessenen Werte. Die Druckzunahme ist auf beiden Seiten statistisch signifikant (rechts und links $p < 0,0001$). In der KG ist ebenfalls eine Zunahme der Werte rechts und links zu beobachten, die etwas geringer ausfällt als in der IG, aber dennoch von statistisch signifikantem Ausmaß ist (rechts $p = 0,0004$, links $p < 0,0001$). Der postinterventionelle Vergleich beider Gruppen zeigt statistisch signifikant größere Werte der IG auf der linken Seite (rechts $p = 0,0827$, links $p = 0,0031$).



Graphik 11: DZI Ferse, der obere/untere Whisker gibt den Min/Max Wert an, die Box umfasst die mittleren zwei Quartile und den Median, die Boxplots der KG sind blau, die der IG rot ausgefüllt, Kontrollgruppe (n=16) und der Interventionsgruppe (n=20) prä- und postinterventionell

Die Druckzeitintegrale der Ferse der IG zeigen eine Zunahme der Werte auf der rechten und linken Seite. Die Zunahme gilt in Bezug auf den Median, die Streubreite der Werte und die maximal gemessenen Werte. Die Zunahme ist auf beiden Seiten von statistisch signifikantem Ausmaß (rechts und links $p = < 0,0001$). In der KG ist ebenfalls eine Zunahme der Werte auf beiden Seiten zu beobachten, die etwas geringer ausfällt als in der IG. Die Zunahme ist auf beiden Seiten statistisch signifikant (rechts $p = 0,0002$, links $p = < 0,0001$). Der postinterventionelle Vergleich der Werte beider Gruppen zeigt keinen statistisch signifikanten Unterschied.

Die Werte der Druckzeitintegrale aus der Abschlussuntersuchung für die drei beleuchteten anatomischen Bereiche sind sowohl in der KG als auch in der IG größer als die Werte der Eingangsuntersuchung. Dies gilt für die rechte und die linke Seite. Die Zunahme der Werte ist in der IG für alle untersuchten anatomischen Bereich stärker als in der KG. Die absolut höchsten Werte wurden sowohl prä- als auch postinterventionell im Fersensegment gemessen.

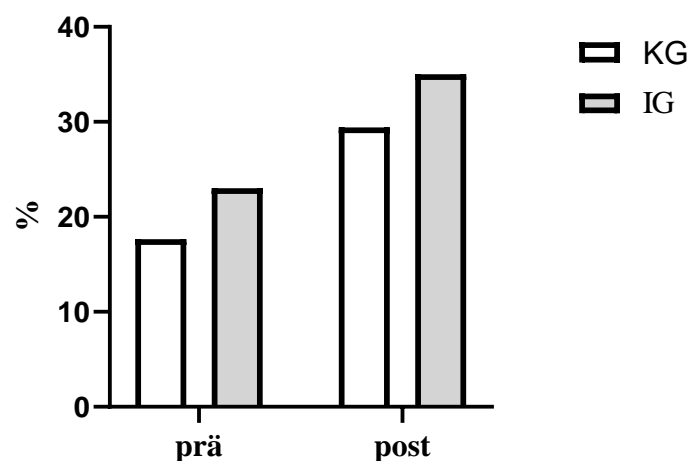
Im Vorfußsegment kommt es in der IG zu einer signifikanten Zunahme der PPP, einer nicht signifikanten Abnahme der Bodenkontaktzeit und einer signifikanten Zunahme des Druckzeitintegrals.

5.2.3.4 Beschwiellung

Tabelle 3: Vorliegen von Beschwiellungen im Vorfuß- und Zehenbereich vor und nach der achtwöchigen Dehnintervention in KG n=17 und IG n=20

	KG	IG
	n/%	n/%
Prä-Beschwiellung	3/17,65	5/25
Post- Beschwiellung	5/29,41	7/35

Anteil der Probanden mit Beschwiellung



Graphik 12: Prozentualer Anteil der Probanden von Kontrollgruppe (n=17) und Interventionsgruppe (n=20) mit übermäßiger Beschwiellung im Vergleich prä- und postinterventionell

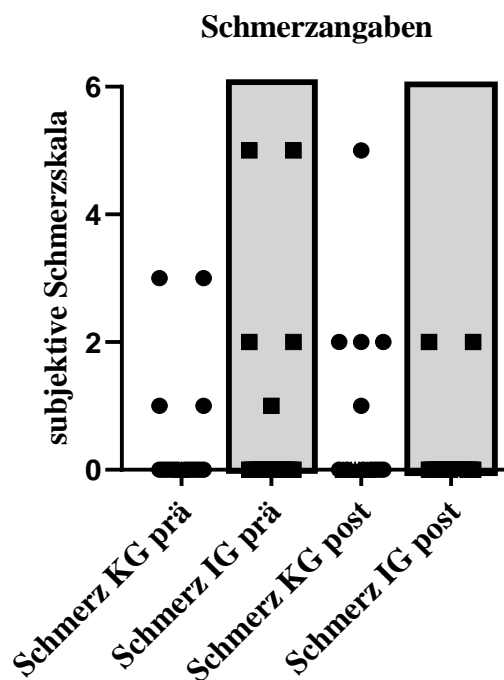
Bei der zu Beginn durchgeführten klinischen Untersuchung fielen bei 8 Probanden pathologische Beschwiellungen im Vorfußbereich auf. Davon fielen 3 auf die Kontrollgruppe und 5 auf die Interventionsgruppe. In der Kontrollgruppe hatte ein

Proband, der zu Beginn eine Beschwiellung aufwies nach Ablauf der 8 Wochen keine Beschwiellung mehr. Dafür wiesen 3 Probanden, die bei der Erstuntersuchung keine auffällige Beschwiellung zeigten, bei der Nachuntersuchung eine solche auf. Bei 2 Probanden war das Beschwiellungsmuster unverändert. In der Interventionsgruppe zeigten 5 Probanden zu Beginn eine Beschwiellung, davon wiesen zwei diese postinterventionell nicht mehr auf. 4 Probanden fielen bei der Nachuntersuchung mit einer vermehrten Beschwiellung auf, die sie bei der Erstuntersuchung nicht gezeigt hatten.

Die Beschwiellungen traten bei nahezu allen Probanden beidseits auf (2 Probanden mit einseitigem Auftreten). Die Beschwiellungen fanden sich alle im Bereich der Großzehen und des Os Metatarsale 1. Einzige Ausnahme stellte ein einmaliges Auftreten im Bereich des Os metatarsale 5 dar.

Anhand der Graphik wird deutlich, dass sowohl in KG als auch IG der Anteil an Probanden mit pathologischer Beschwiellung innerhalb der 8 Wochen zugenommen hat. Dies kommt einer Steigerung von 11,76% in der KG und einer Steigerung von 12% in der IG gleich. Die statistische Auswertung erfolgt mit dem Chi-Quadrat-Test und ergab im Vergleich der prä- und postinterventionellen Werte innerhalb beider Gruppen jeweils keine signifikanten Veränderungen (Signifikanzniveau ($P < 0,05$), (KG: $p = 0,4187$; IG: $p = 0,4902$). Auch der Vergleich der postinterventionellen Werte von KG und IG liefert keine signifikanten Unterschiede.

5.2.3.5 Schmerz



Graphik 13: Aufgeführt sind die Einzelwerte und der Median (breiter Balken) der Schmerzangaben im Vorfußbereich (Schmerzskala 1-10) der KG (n=17) und IG (n=20) prä- und postinterventionell, die Punktwolke der Interventionsgruppe ist grau unterlegt

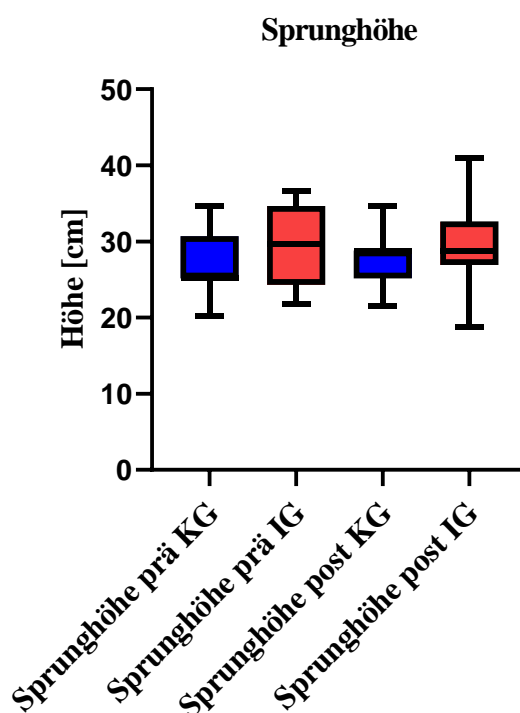
Bei Betrachtung der Punktwolke fällt auf, dass auf Seiten der KG vier Probanden prä- im Vergleich zu 5 Probanden postinterventionell Schmerzen im Vorfußbereich angaben. In der IG reduzierte sich die Zahl von präinterventionell 5 Probanden mit Schmerzangabe auf 2 Probanden postinterventionell. Insofern kommt es in der IG zu einer Reduktion der Probanden mit Schmerzen und in der KG zu einer Zunahme der Probanden mit Schmerzen. Der Median liegt in beiden Gruppen prä- und postinterventionell bei Null. Es liegen keine signifikanten Unterschiede vor.

Bei Zusammenschau der drei Parameter der Pedobarographie, den Schmerzangaben und der Beschwielung muss die Annahme, dass durch zunehmende Dehnung der Wadenmuskulatur eine Reduktion der Vorfußbelastung erzielt werden kann, verworfen werden.

5.2.4 Annahme Nr. 4: Die Dehnintervention bewirkt eine Verkürzung der Bodenkontaktzeit und Vergrößerung der Sprunghöhe bei reaktiven Sprüngen.

5.2.4.1 Sprunghöhe

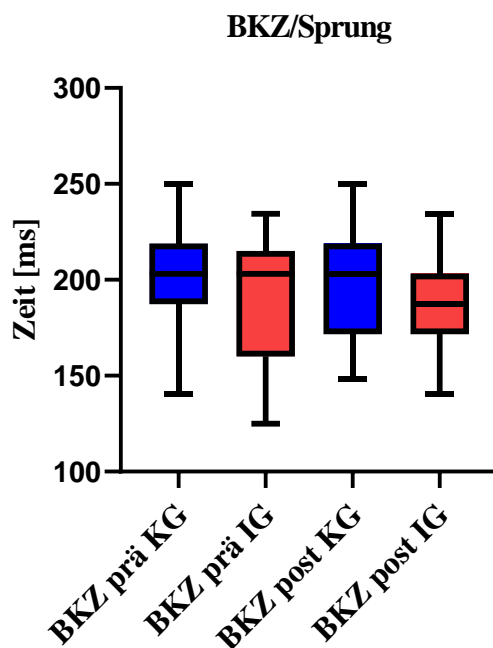
Ein Proband der KG überschritt postinterventionell in allen drei aufgezeichneten Sprüngen die maximale BKZ/Sprung von 250 ms und wurde daher ausgeschlossen. Aus diesem Grund wurden folglich in der KG n=15 Sprungdatensätze ausgewertet.



Graphik 14: Ergebnisse Sprunghöhe des DJ Tests der KG (n=15) und IG (n=20) prä- und postinterventionell, Ziel des Sprungtests waren möglichst kurze BKZ/Sprung bei gleichzeitig maximaler Sprunghöhe, die Säulen der KG sind blau, die der IG sind rot unterlegt

Während die KG postinterventionell etwas höher sprang als präinterventionell, war der Ausgangswert der IG deutlich größer und im Vergleich prä- zu postinterventionell konstant. Die prä/post Vergleiche innerhalb der jeweiligen Gruppe weisen keine statistisch signifikanten Werte auf (KG: $p=0,3894$; IG: $p=0,7841$). Auch die prä/prä ($p=0,1463$) und post/post ($p=0,2751$) Vergleiche beider Gruppen miteinander weisen keine statistische Signifikanz auf.

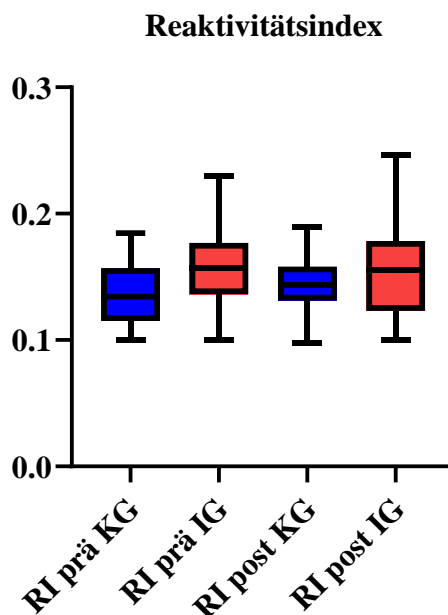
5.2.4.2 Bodenkontaktzeit



Graphik 15: Ergebnisse BKZ/Sprung des DJ Tests der KG (n=15) und IG (n=20) prä- und postinterventionell, Ziel des Sprungtests waren möglichst kurze BKZ/Sprung bei gleichzeitig maximaler Sprunghöhe, es wurden nur Sprünge mit einer BKZ/Sprung ≤ 250 ms berücksichtigt, die Säulen der KG sind blau, die der IG rot unterlegt

Der Median der BKZ/Sprung der IG zeigt eine Abnahme prä- im Vergleich zu postinterventionell. Die Abnahme ist statistisch nicht signifikant ($p=0,9854$). Die Werte der KG zeigen ebenfalls keinen statistisch signifikanten Unterschied ($p=0,8040$). Sowohl der Vergleich der präinterventionellen Werte beider Gruppen miteinander ($p=0,4384$), als auch der postinterventionelle Vergleich ($p=0,4049$) zeigt keine statistisch signifikanten Unterschiede.

5.2.4.3 Reaktivitätsindex (=Sprunghöhe/Bodenkontaktzeit)



Graphik 16: RI Werte des DJ Tests der KG (n=15) und IG (n=20) prä- und postinterventionell, Ziel des Sprungtests waren möglichst kurze BKZ/Sprung bei gleichzeitig maximaler Sprunghöhe, die Säulen der KG sind blau, die der IG rot unterlegt

Aufgrund der leichten Sprunghöhenzunahme und der Abnahme der Bodenkontaktzeit sind die RI Werte postinterventionell im Vergleich zu präinterventionell in der KG etwas größer. Die Veränderung ist statistisch nicht signifikant ($p=0,5245$). Die RI Werte der IG liegen prä- und postinterventionell konstant auf einem deutlich höheren Niveau, als die der KG. Bedingt durch eine geringe Abnahme der Sprunghöhe bei einer gleichzeitigen leichten Abnahme der BKZ/Sprung sind die RI Werte der IG nahezu unverändert. Auch hier liegt keine statistisch signifikante Veränderung vor ($p=0,7841$). Der Vergleich der postinterventionellen RI Werte beider Gruppen miteinander zeigt keine statistisch signifikanten Unterschiede ($p=0,0743$).

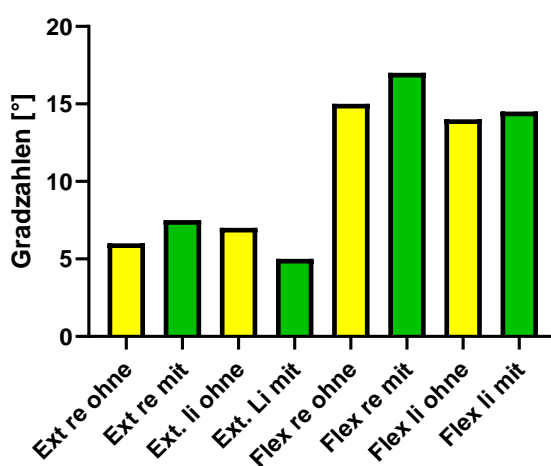
Die RI Werte der KG in Eingangs- und Abschlussuntersuchung sind weitestgehend unverändert. In der IG kommt es zwar zu einer Reduktion der Bodenkontaktzeit, aber gleichzeitig auch zu einer Reduktion der Sprunghöhen. Dies spiegelt sich in einem weitestgehend unverändertem Reaktivitätsindex wider.

Die Annahme, dass eine Dehnintervention zu einer Verbesserung der Leistung bei reaktiven Sprüngen führt, kann anhand der vorliegenden Daten somit nicht bestätigt werden.

5.2.5 Annahme Nr.5: *Spieler mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit distal des Kniegelenks in der Vorgeschichte weisen eine überdurchschnittlich geringe ROM im OSG auf.*

Spieler, die ≥ 2 Verletzungen in der Vorgeschichte aufweisen, werden als Spieler mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit gewertet. Es werden die präinterventionellen ROM Werte im OSG (Silfverskiöld Test) der Probanden mit erhöhter Verletzungsanfälligkeit mit den präinterventionellen Werten der Probanden ohne erhöhte Verletzungsanfälligkeit (< 2 Verletzungen in der Vorgeschichte) verglichen.

ROM im OSG in Abhängigkeit von der Verletzungsanfälligkeit



Graphik 17: Aufgeführt sind die Gradzahlen der Mediane der präinterventionellen Werte der ROM im OSG gemessen mit dem Silfverskiöld Test des gesamten Untersuchungskollektivs (n=41). Das Kollektiv wurde aufgeteilt in Spieler **mit** erhöhter Verletzungsanfälligkeit (≥ 2 Verletzungen in der Vorgeschichte)(n=14; grüne Balken) und Spieler **ohne** erhöhte Verletzungsanfälligkeit (< 2 Verletzungen in der Vorgeschichte)(n=27; gelbe Balken).

Die Gruppe mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit in der Vorgeschichte weist eine größere Beweglichkeit im OSG auf als die Gruppe ohne erhöhte Verletzungsanfälligkeit. Die größere ROM ist sowohl in Extensions- als auch in Flexionsstellung zu beobachten und gilt für die rechte und die linke Seite. Einzige Ausnahme ist das linke Bein in Extensionsstellung. Hier ist der Median der Gruppe ohne erhöhte Verletzungsanfälligkeit größer. Ein statistisch signifikanter Unterschied lässt sich in Flexionsstellung auf der rechten Seite feststellen.

Die Annahme, dass Spieler mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit in der Vorgeschichte eine geringere Beweglichkeit im OSG aufweisen, lässt sich anhand der Daten der vorliegenden Studie nicht bestätigen.

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

1. Unter Anwendung der vorhandenen Definitionen liegt bei einem Großteil der untersuchten Fußballspieler eine IGC vor. (IGC Typ1: rechts: 34,1%, links: 46,3%; IGC Typ2 rechts: 95,1%, links 97,6%). Komplexe Verkürzungen von M. gastrocnemius und M. soleus kommen deutlich seltener vor (rechts: 7,3%, links: 9,8%).
2. Ein achtwöchiges PNF Dehnprogramm zeigt eine gute Wirksamkeit in Bezug auf die Vergrößerung der ROM im OSG. In der IG kam es zu einer Zunahme der ROM in Extensions- und Flexionsstellung auf beiden Seiten mit teilweise statistisch signifikantem Ausmaß. In der KG kam es zu einer Abnahme der ROM in Extensions- und Flexionsstellung auf beiden Seiten mit teilweise statistisch signifikantem Ausmaß.
3. Die pedobarographischen Parameter PPP und DZI zeigen eine vorwiegend statistisch signifikante Zunahme der Werte im Vorfußbereich in KG und IG im Interventionszeitraum. Die BKZ/Laufen zeigte in beiden Gruppen eine statistisch nicht signifikante Abnahme der Werte. Auch im Hallux- und Fersenbereich zeigten sich eine teilweise statistisch signifikante Zunahme der Werte von PPP und DZI in beiden Gruppen. Die Anzahl an Probanden mit Beschwiellung war in beiden Gruppen leicht zunehmend. Die Schmerzangaben im Vorfußbereich waren in der IG im Interventionszeitraum leicht abnehmend und in der KG leicht zunehmend. Statistisch signifikante Veränderungen konnten weder bei der Beschwiellung noch bei den Schmerzangaben beobachtet werden.
4. Die Werte von Sprunghöhe, BKZ/Sprung und RI zeigten weitestgehend konstante Werte in der IG. Die KG konnte eine geringe Zunahme der Sprunghöhe und des RI verzeichnen. Keine der beobachteten Veränderungen zeigte statistisch signifikante Veränderungen.
5. Die Annahme, dass Spieler mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit eine geringere ROM im OSG aufweisen, kann nicht bestätigt werden. Im

untersuchten Kollektiv hatten die Probanden mit >2 Verletzungen in der Vorgeschichte eine größere ROM als die Probanden ohne vermehrte Verletzungen in der Vorgeschichte. Der Unterschied ist statistisch nicht signifikant.

5.4 Prüfung der Kernfrage

Kernfrage: *Bewirkt ein achtwöchiges PNF-Dehnprogramm eine Reduktion der Vorfußbelastung bei semiprofessionellen Fußballern?*

Für die Beantwortung der Kernfrage ist Annahme 3 entscheidend. Die Ergebnisse der pedobarographischen Daten deuten darauf hin, dass trotz des guten Ansprechens auf das PNF Dehnprogramm keine Reduktion der Vorfußbelastung erzielt werden konnte. Sowohl in der IG, als auch in der KG kommt es zu einer Zunahme der Vorfußbelastung. Die Schmerzangaben zeigen sich in der IG im Interventionszeitraum rückläufig. Allerdings ist die Anzahl an Probanden mit Schmerzen im Vorfußbereich insgesamt prä- und postinterventionell relativ gering.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Dehnintervention zu einer Vergrößerung der ROM im OSG führt. Die eindeutige Vergrößerung der ROM führt jedoch nicht zu den erwarteten Veränderungen der Parameter, die die Vorfußbelastung quantifizieren. Aufgrund der Messwerte der vorliegenden Untersuchung kann die These, dass eine Dehnintervention zu einer Reduktion der Vorfußbelastung führt, nicht bestätigt werden.

6. Diskussion/Interpretation

6.1 Material und Methoden

6.1.1 Studienkollektiv

6.1.1.1 Alter

Die beiden Gruppen unterscheiden sich in der Altersstruktur nur geringfügig. In der KG beträgt das arithmetische Mittel 20,11 Jahre. In der IG liegt das Durchschnittsalter bei 24,18 Jahren. Scott et al. untersuchten in ihrer Studie junge und ältere fußgesunde Probanden auf das Vorliegen von Unterschieden in der Fußstruktur und der plantaren Druckverteilung und stellten deutliche Unterschiede fest. Allerdings lag der Altersunterschied der beiden untersuchten Gruppen bei ca. 60 Jahren. In der vorliegenden Studie liegt der Altersunterschied der beiden Gruppen bei etwas mehr als 3 Jahren. Folglich können altersspezifische Auswirkungen auf das plantare Belastungsprofil weitestgehend ausgeschlossen werden.

6.1.1.2 Körpergewicht und BMI

Das durchschnittliche Körpergewicht der KG liegt bei 75,23 kg, der mittlere BMI bei 23,21 kg/m², das durchschnittliche Körpergewicht der IG liegt bei 78,96 kg, der durchschnittliche BMI bei 23,65 kg/m². Somit unterscheidet sich das Körpergewicht der beiden Gruppen um 3,73 kg und der BMI um 0,44 kg/m². Der Gewichtsunterschied entspricht einer Differenz von 4,73%. Unter rein physikalischer Betrachtung wirkt sich das Gewicht eines Probanden direkt auf die Kraft während der pedobarographischen Untersuchung aus. Die beiden Parameter PPP und DZI basieren auf Druckmessungen. Druck ist definiert als einwirkende Kraft pro Fläche. In Bezug auf den Druck ist somit neben dem Gewicht auch die Kontaktfläche der einzelnen Probanden unterschiedlich. In der Literatur werden für Kraft- und Druckwerte sowohl Absolutwerte als auch Werte in Prozent des Körpergewichts angegeben (Chantelau 2009). Neben Gewicht und Kontaktfläche beschreiben Fernando et al. in „The importance of foot pressure in diabetes“ eine Vielzahl von weiteren Einflussfaktoren (Größe, Alter, Schrittlänge, Geschwindigkeit) (Fernando, Crowther et al. 2018). Trotz der relativ geringen

Gewichtsunterschiede der beiden Gruppen kann der Einfluss des Körpergewichts nicht ausgeschlossen werden und findet daher Eingang in der Einordnung der Ergebnisse.

6.1.2 Silfverskiöld Test

6.1.2.1 Durchführung

Der Silfverskiöld Test wird in der Regel als ein klinischer Test beschrieben, der zur Detektion einer IGC bzw. einer komplexen Verkürzung der Wadenmuskulatur herangezogen wird, ohne jedoch anhand von Gradzahlen eine weitere Differenzierung vorzunehmen. Als klinischer Test wird mit Hilfe des Silfverskiöld Tests lediglich festgestellt, ob eine IGC vorliegt oder nicht. Ein Grund hierfür könnte die schwierige praktische Durchführbarkeit im klinischen Alltag durch einen einzigen Untersucher sein. Um das Bewegungsmaß mit einem Goniometer zu messen, muss mindestens eine Hand zur Verfügung stehen, die das Goniometer bedient. In Extensionsstellung des Kniegelenks ist das ohne Probleme möglich, da die Extensionsstellung des Kniegelenks keiner äußeren Stabilisation bedarf. Der Untersucher kann folglich mit einer Hand die Kraft auf die Fußsohle applizieren und mit der zweiten Hand das Goniometer bedienen. In Flexionsstellung des Kniegelenks gestaltet sich die Durchführung deutlich schwieriger: Eine Hand appliziert erneut die Kraft auf die Fußsohle, allerdings wird die zweite Hand benötigt, um die Flexionsstellung im Kniegelenk zu stabilisieren. Somit steht keine weitere Hand für die goniometrische Messung zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Studie das Goniometer mit Hilfe von Tapes am Unterschenkel befestigt, sodass die kraftapplizierende Hand gleichzeitig das Goniometer bedienen kann. Diese Durchführung birgt ein Fehlerpotenzial, da bereits ein geringes Verrutschen des Goniometers bzw. eine Abweichung beim Anbringen des Goniometers sich auf die gemessenen Gradzahlen auswirkt. Es wurde sich jedoch bewusst gegen eine Versuchsdurchführung entschieden, bei der die Flexionsstellung durch den Probanden stabilisiert wird, da unter diesen Bedingungen die Kraft, die der Proband aufwendet um die Flexionsstellung während des Drucks auf die Fußsohle zu halten eine geringere Vergleichbarkeit nach sich ziehen würde als wenn dies bei jeder Durchführung durch den Untersucher geschieht, zumal eine aktive Flexion im Kniegelenk häufig eine Aktivierung der an der Dorsalextension im OSG beteiligten Muskeln bewirkt. Wie bereits Elveru et al. (Elveru, Rothstein et al. 1988) in ihrer Studie

hinsichtlich der Vergleichbarkeit von goniometrischen erhobenen Werten feststellen, ist die Vergleichbarkeit von Werten, die durch unterschiedliche Untersucher erzielt wurden, kritisch zu bewerten. Die Werte eines Versuchers weisen jedoch eine gute Reproduzierbarkeit und somit eine gute Vergleichbarkeit mit den eigenen Werten auf. Um die subjektive Komponente bei der Kraftapplikation zu reduzieren wurde in der vorliegenden Studie nach dem Vorbild von Barouk et al. (Barouk and Barouk 2014) mit Hilfe einer Waage die Reproduzierbarkeit der applizierten Kraft verbessert. Allerdings sind insbesondere die Werte in Flexionsstellung des Kniegelenks nicht nur von der auf die Fußsohle ausgeübten Kraft, sondern auch von der Kraft, die am Femur zur Stabilisation der Flexionsstellung ausgeübt wird, abhängig. Sobald der Untersucher mit der am Kniegelenk befindlichen Hand nicht ausschließlich stabilisiert, sondern einen Gegendruck ausübt, addieren sich die Kräfte der in entgegengesetzte Richtungen weisenden Kraftvektoren und es resultiert eine größere auf das OSG wirkende Kraft. Eine Objektivierung der applizierten Kraft wäre mit Hilfe eines Equinometers möglich, wie es DiGiovani et al. 2002 in „Isolated gastrocnemius tightness“ beschreiben. Das erwähnte Gerät ist jedoch nicht auf dem Markt erhältlich, sondern wurde eigens für die erwähnte Studie entworfen.

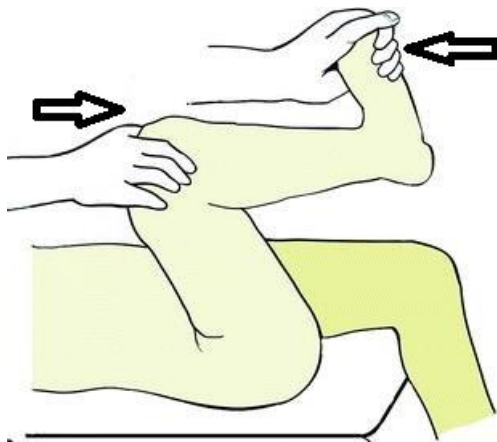


Abb. 10.: Verdeutlichung der während der Durchführung des Silfverskiöld Tests in Flexionsstellung möglichen wirkenden Kräfte mit Hilfe von Kraftvektoren. Modifiziert aus Orthopädische Fußchirurgie: Manual für Klinik und Praxis, 2018 (Engelhardt 2018)

6.1.2.2 Problematik von IGC Definitionen

Unabhängig von der bereits beschriebenen erschwerten Vergleichbarkeit der Gradzahlen aufgrund der variablen Durchführung des Silfverskiöld Tests, sind auch die Auswertungen hinsichtlich des Vorliegens einer IGC anhand von Schwellenwerten kritisch zu betrachten.

Die von Barouk et al. (Barouk and Barouk 2014) aufgestellte Definition basiert auf manuell gemessenen Werten und verspricht daher zunächst einmal eine gute Vergleichbarkeit mit den Werten der vorliegenden Studie. Hinsichtlich der korrekten Durchführung des Silfverskiöld Tests liefern Barouk et al. sehr genaue Informationen. Insbesondere die Beschreibung des Ausgleichs einer flexiblen valgischen Rückfußachse stellt eine hilfreiche Basis bei der Durchführung dar. Die Definition des Startpunkts der Messung, die Barouk et al. über den Beginn der spürbaren Dehnungsspannung definieren, scheint schwer objektivierbar und birgt die Gefahr, dass bereits der Ausgleich der natürlicherweise leicht plantarflektierten Stellung des Fußes als gastrocnemiusassoziierte Dehnungsspannung wahrgenommen wird. Aus diesem Grund wurde sich in der vorliegenden Studie für die besser objektivierbaren 90° als Referenz entschieden. Aufgrund der unterschiedlichen Definition der Messbereiche ist ein Vergleich der Werte von Barouk et al mit den Werten der vorliegenden Studien nicht aussagekräftig.

Die von DiGiovanni et al. (DiGiovanni, Kuo et al. 2002) aufgestellten Schwellenwerte basieren auf Messungen, die mit einem Equinometer gemessen wurden. Das in der Studie von DiGiovanni et al. verwendete Equinometer wurde von den Autoren zum Zweck der Studie hergestellt, um untersucherbedingte Verzerrungen bei der Kraftapplikation zu eliminieren. Wie schon bereits zuvor erwähnt, stellt die Definition der Neutralstellung einen entscheidenden Punkt hinsichtlich der Vergleichbarkeit von Gradzahlen des Silfverskiöld Tests dar. DiGiovanni et al. bringen den Fuß vor Beginn der Kraftapplikation durch das Equinometer in eine Neutralposition und messen die Differenz der Gradzahl nach Kraftapplikation. Dies entspricht dem Vorgehen der vorliegenden Studie. Insofern unterscheiden sich die Daten von DiGiovanni et al. und der vorliegenden Studie einzig hinsichtlich der Modalität der Kraftapplikation (Equinometer und manuell). Folglich dienen die Werte von DiGiovanni et al. in der vorliegenden Studie als Definition von IGC und komplexer Verkürzung.

6.1.3 Pedobarographie

6.1.3.1 Sensorenabhängige Fehlerquellen

Als sensorenabhängige Fehlerquellen der Pedobarographie sind Hysterese und Crosstalk zu nennen. Hysterese bezeichnet eine nicht vollständige Rückkehr eines Sensors zum Neutralwert nach Aktivierung durch Belastung. Bei erneuter Aktivierung durch Belastung werden durch die Verschiebung des Nullpunktes höhere Werte aufgezeichnet. Das Ausmaß des zurückbleibenden Wertes nach Entlastung des Sensors wird als Hystereseeffekt bezeichnet. Der Hystereseeffekt wird in Prozent angegeben und wird bei modernen Messgeräten mit unter 5% angegeben. Als weitere sensorenbedingte Fehlerquelle ist der Crosstalk zu nennen. Unter Crosstalk versteht man die Mitaktivierung benachbarter Sensoren bei Belastung. Folglich kann auch durch diesen Effekt eine Beeinflussung der gemessenen Werte und dadurch auch des plantaren Belastungsprofils auftreten.

6.1.3.2 Laufgeschwindigkeit

Der Versuchsaufbau der dynamischen Pedobarographiemessung weist verschiedene Schwachpunkte auf. Auf alle in der vorliegenden Studie beleuchteten Parameter (PPP, Kraftzeitintegral, BKZ/Laufen) hat die Laufgeschwindigkeit der Probanden einen Einfluss. Segal et al. untersuchen insbesondere den Einfluss auf den Parameter PPP und kommen zu dem Ergebnis, dass der Einfluss der Laufgeschwindigkeit in den einzelnen anatomischen Bereichen unterschiedlich stark ausgeprägt ist und empfehlen daher eine Normierung der Laufgeschwindigkeit (Segal, Rohr et al. 2004). Aus diesem Grund stellen in Laufbänder integrierte Messplatten den Goldstandard der dynamischen Pedobarographie dar. In der vorliegenden Studie war dieser Versuchsaufbau nicht möglich und wurde mit einem Metronom kompensiert. Über diesen akustischen Reiz mit 100 bpm (= beats per minute) wurde ein gleichmäßiges und vergleichbares Lauftempo gewährleistet. Die BKZ/Laufen eines gesamten Abrollvorgangs, ist der Parameter, der Rückschlüsse auf die Laufgeschwindigkeit zulässt. Die Mittelwerte der BKZ/Laufen des vollständigen Abrollvorgangs deuten darauf hin, dass über die gewählte Methode mit Hilfe eines Metronoms, eine gute Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Die BKZ/Laufen Werte der KG liegen präinterventionell links bei 759,8ms und rechts bei 766,7 ms. Die BKZ/Laufen Werte der IG liegen präinterventionell links bei

718 ms und rechts bei 713 ms. Die postinterventionellen Werte beider Gruppen auf der linken Seite sind nahezu identisch mit 730,8 ms in der KG und 733 ms in der IG. Die Werte auf der rechten Seite liegen bei 754,4 ms in der KG und 733,4ms in der IG. Die Werte deuten auf eine relativ gute Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeit mit Hilfe eines Metronoms hin, dennoch bleibt diese Methode der Laufbandmessung, hinsichtlich der Normierung der Laufgeschwindigkeit und den sich daraus ergebenden Konsequenzen auf weitere Parameter unterlegen und gewährleistet eine geringere Vergleichbarkeit als der Goldstandard.

6.1.3.3 Gangbild

In Ganglaboren sind Messplatten, falls nicht in das Laufband integriert, in den Boden eingelassen. Durch diesen Aufbau wird einem unnatürlichen Gangbild bzw. einer unnatürlichen Schrittlänge vorgebeugt. Dieses unnatürliche Gangbild entsteht meist durch den Versuch des Probanden den Fuß möglichst zentral im Messbereich zu platzieren und dadurch wird von der individuellen Schrittlänge abgewichen. In der vorliegenden Studie war auch dieser Versuchsaufbau nicht realisierbar, da es sich um eine mobile Platte handelte und diese nicht in den Boden integriert werden konnte. Die Höhe der Platte beträgt zwar lediglich 1,2 cm, führte aber dennoch dazu, dass die Probanden zu Beginn immer wieder durch den Untersucher darauf hingewiesen werden mussten, den Blick möglichst nicht auf die Platte zu richten. Der Hinweis des Untersuchers, dass partielle Fußabdrücke kein Problem seien und gelöscht würden und wiederholtes Überschreiten der Platte führte letztlich dazu, dass bei allen Probanden Messungen eines weitestgehend natürlichen Gangbilds erfolgen konnten. Der Versuchsaufbau weist somit einen etwas höheren Zeitaufwand als der Goldstandard auf, der Einfluss auf das Gangbild ist jedoch eher zu vernachlässigen.

6.1.3.4 Parameter

PPP

Der Parameter des maximalen plantaren Drucks muss hinsichtlich seiner Aussagekraft, insbesondere unter den Bedingungen der vorliegenden Studie, differenziert betrachtet werden. Der Parameter steht in Zusammenhang mit der Laufgeschwindigkeit des

Probanden (Segal, Rohr et al. 2004). Für die Normung der Laufgeschwindigkeit ist die Laufbandmessung am besten geeignet. Allerdings weisen Hong Y et al. in ihrer Studie daraufhin, dass sich auf dem Laufband gemessene Werte der Pedobarographie von Werten unterscheiden, die auf natürlichem Untergrund gemessen werden (Hong, Wang et al. 2012). Dieses Erkenntnis deutet daraufhin, dass in Bezug auf eine möglichst realitätsnahe Erfassung von Spitzendrücken die Laufbandmessung dem Aufbau der vorliegenden Studie unterlegen ist. In Bezug auf die Vergleichbarkeit hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der prä- und postinterventionellen Spitzendrücke eines einzelnen Probanden, aber auch der Vergleichbarkeit der Probanden untereinander ist die Laufbandmessung dem Verfahren der vorliegenden Studie jedoch überlegen. Eine weitere Einflussgröße, die in der Literatur genannt wird, ist das Gewicht. Hotfiel et al. stellten fest, dass eine Zunahme des Körpergewichts bei stark übergewichtigen Patienten zu einer Zunahme der gemessenen Werte von PPP führt (Hotfiel, Carl et al. 2017). Eine Normierung der Werte in Bezug auf das Gewicht wird vor allem in Studien durchgeführt, die sich mit den Auswirkungen von Übergewicht auf das plantare Belastungsprofil beschäftigen. De Castro et al. weisen jedoch daraufhin, dass kein klarer Konsens in der Literatur herrscht, ob sich das erhöhte Gewicht auf die horizontal oder die vertikal wirkenden Kräfte während des Laufens auswirkt (de Castro, Abreu et al. 2014). Über die Sinnhaftigkeit bzw. Notwendigkeit der Normierung bei Studien mit nur geringen Gewichtsunterschieden der Probanden, wie es in der vorliegenden Studie der Fall ist, herrscht kein klarer Konsens. Aus den genannten Gründen werden jedoch in die Interpretation der Absolutwerte mögliche Einflussfaktoren miteinbezogen.

BKZ/Laufen

Die BKZ/Laufen eines gesamten Abrollvorgangs ist ebenfalls abhängig von der Laufgeschwindigkeit. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden daher nicht die absoluten BKZ/Laufen der einzelnen Segmente miteinander verglichen, sondern der Anteil in Prozent eines Segments an der Zeit des gesamten Abrollvorgangs. Auf diese Weise können Schritte unterschiedlicher Geschwindigkeit miteinander verglichen werden. Dies gilt jedoch nur für Geschwindigkeiten, die nicht zu stark voneinander abweichen. Während bei niedrigen Geschwindigkeiten vorwiegend im Fersenlauf gegangen wird, ist das Sprinten gekennzeichnet durch einen reinen Vorfußlauf. In der vorliegenden Studie liegen keine derartig großen Unterschiede der Laufgeschwindigkeit vor, sodass von keiner Beeinflussung des Belastungsmusters ausgegangen werden kann.

Druckzeitintegral

Die Auswahl dieses Parameters erfolgte zur Quantifizierung des Kumulativdrucks während eines Abrollvorgangs. Im Gegensatz zu dem Parameter PPP, der lediglich eine Aussage über den maximalen Druck zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Kontaktphase trifft, bezieht das Druckzeitintegral den Faktor Zeit mit ein und erlaubt so aussagekräftigere Rückschlüsse auf die faktische Belastung des betroffenen anatomischen Bereichs. Bus et al stellen zwar in einem Review die Notwendigkeit der Erfassung des Druckzeitintegrals zusätzlich zur PPP in Frage und kommen zu dem Ergebnis, dass eine hohe Korrelation der beiden Parameter besteht und daher der zusätzliche Aussagewert fraglich ist. (Bus and Waaijman 2013) Dennoch ist die Erfassung und Auswertung des Parameters nach wie vor in der Pedobarographie weit verbreitet. Aus den bei dem Parameter PPP aufgeführten Gründen erfolgte auch in Bezug auf diesen Parameter keine Normierung der Werte. Ein Einfluss der Geschwindigkeit ist jedoch auch in Bezug auf diesen Parameter nicht auszuschließen.

6.1.3.5 Segmentierung

Die in der vorliegenden Studie verwendete Plattensoftware DICAM 3 der Firma Diers teilt den Fuß in 10 Segmente (Hallux, Zehen 2-5, jeweils Metatarsus 1-5, Mittelfuß, mediale und laterale Ferse). In der englischsprachigen Literatur wird dieser Vorgang als masking bezeichnet. Miner et al. verweisen in ihrer Arbeit auf den Mangel an Standardisierung des Segmentierungsprozesses und die daraus resultierende eingeschränkte Vergleichbarkeit (Miner-Williams 2017). Das masking unterschiedlicher Hersteller unterscheidet sich hinsichtlich der ausführenden Instanz (manuell durch den Untersucher oder automatisch mit Hilfe von Algorithmen) und des Ansatzes der Aufteilung (geometrisch oder anatomisch). Bedingt durch diese mangelnde Standardisierung sind die Werte unterschiedlicher Studien nur bedingt miteinander vergleichbar. Innerhalb einer Studie nimmt die Reproduzierbarkeit des maskings mit steigender Segmentanzahl ab. Für die vorliegende Studie wurden Metatarsus 1-5 als Vorfußsegment zusammengefasst. Laterale und mediale Ferse wurden als Fersensegment zusammengefasst. In Studien, die Aussagen ausschließlich auf der Basis von pedobarographischen Daten treffen, ist eine stärkere Segmentierung aufgrund der genaueren Betrachtung des plantaren Belastungsprofils notwendig und Verzerrungen

durch die Segmentierung selbst können eher in Kauf genommen werden. Da in der vorliegenden Studie die pedobarographischen Daten jedoch nur einen Teilaspekt der Arbeit darstellen, ist eine Reduktion der Segmentanzahl zugunsten der Reproduzierbarkeit sinnvoll und verringert masking bedingte Fehlerquellen.

6.1.3.6 Auswahl des gewerteten Schritts

Bei den Werten der Parameter PPP, BKZ/Laufen und DZI aus der pedobarographischen Messung handelt es sich um die Werte eines realen Schritts. Es ist hervorzuheben, dass es sich nicht um einen aus Durchschnittswerten bestehenden Schritt handelt. Im Zuge der Messung wurden pro Fuß drei Abrollvorgänge erfasst. Aus diesen Werten wird der mittlere Schritt gebildet und mit den einzelnen Schritten abgeglichen. Der reale Schritt, der dem mittleren Schritt am stärksten gleicht, wird für die Auswertung verwendet. Dieses Verfahren wurde mit der Software DICAM 3 der Firma Diers durchgeführt. Der Grund für die Überlegenheit dieses Verfahrens wird in der besseren Aussagekraft realer Schritte im Vergleich zu mittleren Schritten gesehen. Gleichzeitig wird durch dieses Verfahren verhindert, dass Ausreißer das Ergebnis verfälschen. Das Verfahren des mittleren Schrittes verbindet somit die Vorteile der Auswertung eines realen Schrittes mit den Vorteilen von Durchschnittsschritten. Für das Verfahren des mittleren Schritts haben sich drei Schritte als ausreichend herausgestellt.

6.1.4 *Dropjump Test*

Der Drop Jump gilt unter den gängigen Sprungtests als der anspruchsvollste Sprung. Beim DJ handelt es sich um einen Reaktivsprung. Von einem Reaktivsprung kann nur gesprochen werden, wenn die Bodenkontaktzeit eine bestimmte Dauer nicht überschreitet. Falls es zu einer Überschreitung der BKZ/Sprung kommt, kommt der Reaktivsprüngen zugrunde liegende Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus nicht mehr zum Tragen. Einen allgemein gültigen numerischen Grenzwert für komplexe Bewegungsabläufe fest zu legen, ist grundsätzlich kritisch zu betrachten. Die Tatsache, dass lediglich ein Proband nicht in der Lage war die geforderte BKZ/Sprung von <250ms zu erfüllen zeigt, dass nahezu alle Probanden den koordinativen Grundvoraussetzungen des Sprungs gewachsen waren und der Grenzwert den Fähigkeiten des Kollektivs entspricht. Ein weiterer Grund für die korrekte

Durchführung von nahezu allen Probanden ist der Umstand, dass alle Probanden einen derartigen Sprung nicht zum ersten Mal ausführten. Insofern ist der hohe koordinative Anspruch nicht als Einflussfaktor auf die Messwerte zu werten, da alle Probanden mit dem Ablauf vertraut sind. Ein weiteres Verfahren, um einen Sprung als Reaktivsprung zu definieren, stellt die Beobachtung des plantaren Belastungsprofils während des Brems- und Kraftstoßes dar. Als Ausschlusskriterium gilt bei diesem Verfahren ein Durchschlagen der Ferse. In der vorliegenden Studie fand dieses Kriterium keine Berücksichtigung. Aufgrund der Tatsache, dass die Zielsetzung des Sprungs eine maximale Sprunghöhe bei minimaler Bodenkontaktzeit war, hat der Reaktivitätsindex eine hohe Aussagekraft.

6.1.5 Dehnintervention

Ziel der gewählten Dehnintervention war primär eine größtmögliche Zunahme der ROM im OSG bei gleichzeitig leichter Durchführbarkeit. Die einfache Durchführbarkeit war entscheidend, da eine direkte Kontrolle der Compliance nicht gewährleistet werden konnte und die bloße Anwesenheit im Training/Spiel als durchgeführte Dehnintervention gewertet wurde. Es ist anzunehmen, dass ein einfacheres Dehnprogramm die Compliance auf zweierlei Weise verbessert:

1. Ein einfaches Dehnprogramm wird eher durchgeführt als ein komplexes Dehnprogramm.
2. Eine korrekte Durchführung ist bei einem einfacheren Dehnprogramm eher gewährleistet als bei einem komplexen Dehnprogramm.

Hinsichtlich der korrekten Durchführung des PNF Stretchings sind einerseits die korrekte zeitliche Abfolge und der individuelle Krafteinsatz fehleranfällig. Der Zeitablauf wird lediglich durch die Probanden mittels selbstständigen Zählens der Sekunden gemessen. Auch wenn es sich um recht kurze Zeitintervalle handelt, ist hier davon auszugehen, dass interindividuell und auch zwischen einzelnen Dehninterventionen des gleichen Probanden Unterschiede im zeitlichen Ablauf aufgetreten sind. Um die größtmögliche Auswirkung auf das ROM zu erreichen, werden in der Literatur in Bezug auf die MVIC (= maximum voluntary isometric contraction) Werte von 100% angegeben. Ob die Probanden diesen Wert erzielen konnten bzw. wieviel Prozent der individuellen Kraft aufgewendet wurden, ist unter den

Versuchsbedingungen der vorliegenden Studie nicht messbar. Außer subjektiver Rückmeldungen durch das Trainerteam und die Probanden selbst, dass die Dehnintervention regelmäßig durchgeführt worden sei, kann keine Aussage über die tatsächliche Compliance getroffen werden.

Radford et al. beschreiben in ihrem Review über die Auswirkung von statischen Dehnübungen auf die ROM im OSG, dass die Messung der ROM in den eingeschlossenen Studien kurz nach der letzten Dehnintervention erfolgte. Auch die im Review von Hindle et al. eingeschlossenen Studien messen die Auswirkungen des PNF Dehnens unmittelbar nach einer Dehnintervention (Hindle, Whitcomb et al. 2012). Spernoga et al. beispielsweise beziffern die Dauer der ROM Veränderung nach einmaliger Durchführung einer PNF Dehnintervention auf 6 min (Spernoga, Uhl et al. 2001).

Aufgrund des Versuchsaufbaus der vorliegenden Studie, wonach mindestens 24h zwischen der letzten Dehnintervention und der abschließenden Messung der ROM lagen, sind Veränderungen der ROM als relativ stabile mittel bis langfristige Dehnwirkungen zu werten.

Im Gegensatz zu den Vorteilen in Bezug auf Vergrößerung der ROM, wird der PNF Methode hinsichtlich der Auswirkungen auf sportliche Leistungen, die Maximalkraft erfordern, ein nachteiliger Effekt attestiert. So fanden Mikolajec et al. beispielsweise eine Reduktion der Sprunghöhe bei Drop Jumps im Anschluss an eine PNF Dehnintervention (Mikolajec, Waskiewicz et al. 2012). Die PNF Dehnung wurde auch bei dieser Studie unmittelbar vor den DJ Tests durchgeführt. In der vorliegenden Studie erfolgte die Sprungkraftmessung mittels DJ Tests ebenso wie die Messung der ROM mit einem Mindestabstand von 24h zur letztmaligen Dehnung. Trotz der unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkte lassen sich die Auswirkungen der PNF Methode mit einer Zunahme der ROM bei gleichzeitiger Abnahme von explosiver sportlicher Leistung zusammenfassen.

Die gegensätzlichen Effekte der PNF Dehnintervention in Bezug auf ROM und Sprungkraft sollte in zukünftigen Studien, die sowohl Veränderungen der ROM als auch Auswirkungen auf die Sprungkraft untersuchen, beachtet werden.

6.1.6 Statistische Auswertung

Hinsichtlich der statistischen Auswertung ist zu beachten, dass aufgrund der Vielzahl der statistischen Tests zum Vergleich der ROM-Werte mit Hilfe des Wilcoxon-Tests (gepaart und ungepaart) rein zufällig signifikante Werte auftreten können. Die Tests werden jedoch nur explorativ durchgeführt und nicht zur schlussfolgernden Statistik herangezogen.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Isolierte Verkürzung des *M. gastrocnemius* bei Fußballspielern

Die Einordnung der Ergebnisse auf Vorliegen einer Verkürzung der Wadenmuskulatur und insbesondere auf Vorliegen einer IGC bei Fußballspielern sollte vor dem Hintergrund der bereits diskutierten Problematik von IGC Definitionen geschehen. Die Methodik der Datengewinnung von DiGiovanni et al. (DiGiovanni, Kuo et al. 2002) und der vorliegenden Studie in Bezug auf die applizierte Kraft und die Definition des Messbereichs gleichen sich. Die Modalität der Kraftapplikation unterscheidet sich. Bei nahezu allen Probanden liegt Definition Typ 2 folgend eine IGC vor. Es bleibt offen, ob Definition Typ 2 deutlich zu großzügig gewählt ist oder ob sie die formulierte Annahme, dass Fußballspieler eine IGC aufweisen zweifelsfrei bestätigt. Bei Annahme von Definition Typ 1 sind die Ergebnisse bei weitem nicht so deutlich wie bei Typ 2, dennoch liegt auch bei dieser Definition bei etwas mehr als einem Drittel der Probanden eine IGC vor. Ein weiterer Hinweis für das Vorliegen von IGC bei Fußballspielern, ist die Tatsache, dass entgegen der relativ hohen Anzahl an IGC nur relativ wenige Probanden die Definition einer komplexen Verkürzung der Wadenmuskulatur erfüllen. Lediglich bei 10% der Probanden liegt eine komplexe Verkürzung vor.

Für eine aussagekräftigere Prüfung auf das Vorliegen von IGC, bedarf es einer klareren Normierung der Durchführung des Silfverskiöld Tests. Zudem ist für die Festlegung von verlässlichen Schwellenwerten, die Untersuchung größerer Populationen notwendig. Die Grenzwerte von DiGiovanni et al. (DiGiovanni, Kuo et al. 2002) basieren auf den Messungen an insgesamt lediglich 68 Probanden, anhand derer anschließend die Grenzwerte vorgeschlagen wurden.

Trotz der beschriebenen Einschränkungen deuten die Daten der vorliegenden Studie stark daraufhin, dass Fußballspieler eine IGC aufweisen.

6.2.2 Auswirkungen der Dehnintervention auf das Ausmaß der Beweglichkeit

Grundsätzlich ist es wichtig beim Vergleich der Werte beider Gruppen zu bedenken, dass es sich bei der vorliegenden Studie nicht um einen Vergleich von Dehnintervention versus keine Dehnintervention handelt. Die KG führte in der Zeit zwischen Eingangs- und Abschlussuntersuchung ebenfalls Dehnungen der Wadenmuskulatur durch, die jedoch unverändert zu den Dehngewohnheiten vor Beginn der Studie waren. In welchem Ausmaß die Probanden der KG vor der Eingangs- und zwischen Eingangs- und Abschlussuntersuchung die Wadenmuskulatur gedehnt haben, wurde nicht erfasst. Der Unterschied der Wadendehnung beider Gruppen während des Untersuchungszeitraums besteht somit darin, dass die IG im Interventionszeitraum ein PNF Dehnprogramm durchführten und dazu auch immer wieder motiviert wurden und die KG ein nicht näher spezifiziertes Dehnprogramm durchgeführt haben. Es ist jedoch hervorzuheben, dass die KG nicht die Vorgabe erhielt im Interventionszeitraum keine Dehnung der Wadenmuskulatur durchzuführen.

Bereits bei isolierter Betrachtung der prä- und postinterventionell gemessenen Werte des Bewegungsausmaßes der IG fällt der Zuwachs an Beweglichkeit im OSG auf. Wenn man die Werte der KG in die Auswertung mit einbezieht, ist der Zuwachs an Beweglichkeit in der IG noch eindrücklicher, da in der KG eine Abnahme der ROM in Flexions- und Extensionsstellung auf beiden Seiten festgestellt werden konnte. Als mögliche Erklärung für die durchschnittliche Verringerung der ROM in der KG kann eine zunehmende Belastung/Ermüdung mit resultierender Reduktion der Dehnfähigkeit durch den fortgeschritteneren Saisonzeitpunkt angeführt werden. Umso mehr hervorzuheben ist die Tatsache, dass die IG eine Vergrößerung des ROM verzeichnen konnte obwohl sie durchschnittlich knapp 5 Trainingseinheiten mehr im Interventionszeitraum absolviert hat (KG: durchschnittlich 30,41 Trainingseinheiten; IG: durchschnittlich 35,3 Trainingseinheiten). Die Ergebnisse von Caldwell et al. widersprechen der aufgestellten These, dass es in der KG aufgrund des fortgeschritteneren Saisonzeitpunkts zu einer Reduktion der ROM gekommen ist. Die Autoren untersuchten semiprofessionelle Fußballspieler neben anderen Parametern auf die Dehnfähigkeit im Saisonverlauf und kamen zu dem Ergebnis, dass es im Saisonverlauf zu einer Zunahme der Dehnfähigkeit bei den untersuchten Probanden

kam(Caldwell and Peters 2009). Diesen Ergebnissen folgend könnte man die ROM Zunahme der IG im Rahmen der höheren Anzahl an absolvierten Trainingseinheiten werten. Caldwell et al. treffen jedoch keine Aussage über eine bestimmte Anzahl an absolvierten Trainingseinheiten, sondern führen lediglich Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Saisonverlauf durch.

Anhand der Daten der vorliegenden Studie kann die Wirksamkeit des PNF Dehnens insbesondere im direkten Vergleich mit der Kontrollgruppe in Bezug auf eine Vergrößerung der ROM im OSG bestätigt werden.

6.2.3 Pedobarographie Daten

PPP

Die Werte des maximalen plantaren Drucks nehmen in allen untersuchten Segmenten in beiden Untersuchungsgruppen zu. Insbesondere vor dem Hintergrund eines wirkungsvollen Wadendehnungsprogramms der IG wäre eine Reduktion der Werte im Vorfußsegment bei gleichzeitiger Zunahme im Fersensegment zu erwarten gewesen. Entgegen dieser dem allgemeinen biomechanischen Verständnis folgenden Annahme nahmen die Werte jedoch in beiden Gruppen in allen Segmenten statistisch signifikant zu. Dementsprechend scheint eine Vergrößerung der ROM im OSG sich nicht reduzierend auf den Parameter PPP auszuwirken. Wodurch die Zunahme der Werte zustande kommt, ist unklar. Macklin et al. (Macklin, Healy et al. 2012) beobachten ähnliche Veränderungen in ihrer 2012 veröffentlichten Studie bei Läufern. Die mit Hilfe von In-Schuh Sohlen gemessenen dynamischen PPP Werte zeigen ebenfalls einen signifikanten Anstieg bei gleichzeitig signifikanter Zunahme der ROM im OSG. Gründe bzw. mögliche pathoanatomische Zusammenhänge dieser sich scheinbar widersprechenden Veränderungen lassen auch Macklin et al. offen. Die Kernhypothese der vorliegenden Studie, dass durch ein Wadendehnungsprogramm eine Reduktion der Vorfußdrücke erzielt werden kann, muss in Bezug auf die Spitzendruckwerte somit verworfen werden und bedarf weiterer Untersuchungen.

BKZ/Laufen

Ein wichtiger Aspekt bei der Beurteilung plantarer Belastungen ist nicht nur der maximale Druck, dem die einzelnen Segmente ausgesetzt sind, sondern auch, über welche Zeitspanne hinweg Kräfte auf sie wirken. Insofern kann eine Reduktion der Vorfußbelastungszeiten auch eine Reduktion der Vorfußbelastung bedeuten selbst wenn die maximalen Vorfußdrücke zunehmen. Eine Reduktion der Vorfußbelastungszeiten würde beim Gehen als Konsequenz eine Zunahme der Fersenbelastungszeiten nach sich ziehen und könnte als Zeichen eines gleichmäßigeren Abrollvorgangs gewertet werden.

Die Werte der IG zeigen postinterventionell eine Abnahme des Anteils der Vorfußbelastungszeit an der gesamten BKZ/Laufen. Diese Veränderung auf die Intervention zurückzuführen ist jedoch aufgrund der gleichzeitigen Abnahme in der KG fraglich. Die Abnahme ist in beiden Gruppen zudem statistisch nicht signifikant. Entgegen der formulierten Erwartung, dass eine Reduktion des BKZ/Laufen Anteils des Vorfußes zu einer Zunahme des Fersenanteils führt, nehmen auch diese Werte sowohl in der KG als auch der IG ab.

Druckzeitintegral

Das Druckzeitintegral als Ausdruck der Gesamtbelastung während eines Abrollvorgangs zeigt einen deutlichen Anstieg der Werte in beiden Gruppen. Die Zunahme ist auf beiden Seiten zu beobachten. Auffallend ist die stärkere Zunahme auf Interventionsgruppenseite. Ein Faktor der die Werte des DZI direkt beeinflusst ist die Belastungszeit des jeweiligen Segments. Diese Werte sind jedoch aufgrund der unterschiedlichen prä- und postinterventionellen Bodenkontaktzeiten der beiden Gruppen kritisch zu betrachten.

Tab.4: Durchschnittswerte der prä- und postinterventionellen Werte (prä/post) der BKZ/Laufen eines gesamten Abrollvorgangs von KG und IG des rechten und linken Fußes gemessen in Millisekunden [ms]

	KG	IG
rechts	767/754	712/733
links	760/731	718/733

Die in der Tabelle aufgeführten sowohl prä- als auch postinterventionell kürzeren BKZ/Laufen der IG deuten darauf hin, dass die IG durchschnittlich etwas schneller gelaufen ist als die KG. Außerdem ist anhand der längeren bzw. kürzeren BKZ/Laufen zu beobachten, dass die IG postinterventionell durchschnittlich etwas langsamer und die KG durchschnittlich etwas schneller gelaufen ist.

Aufgrund dieser Unterschiede ist die vermeintliche deutliche Zunahme des Druckzeitintegrals in allen anatomischen Bereichen in der IG womöglich geringer als die Werte zeigen, da sich die durchschnittliche BKZ/Laufen des gesamten Abrollvorgangs von 712 ms und 718 ms auf 733 ms erhöht hat. In der KG verhält es sich gegenläufig. Die durchschnittliche BKZ/Laufen des gesamten Abrollvorgangs betrug präinterventionell rechts 767 ms und links 760 ms. Postinterventionell lagen sie rechts bei 754 ms und links bei 731 ms. Insofern ist die geringere Zunahme der Werte in der KG womöglich stärker und die Zunahme der Werte in der IG womöglich geringer. Eine gute Vergleichbarkeit erlauben die postinterventionellen Werte beider Gruppen auf der linken Seite miteinander, da hier beide Gruppen mit 731 ms und 733 ms eine nahezu identische mittlere BKZ/Laufen aufweisen. Die Werte der IG sind bei nahezu gleicher BKZ/Laufen im Bereich des Vorfußes statistisch signifikant größer als die der KG. Im Hallux- und im Fersensegment gilt das Gleiche jedoch ohne statistische Signifikanz.

Den genannten Einschränkungen gegenüber steht die Frage, ob die Unterschiede der BKZ/Laufen und deren vermeintlicher Einfluss auf die Werte des DZI so zutreffen. Während in der Theorie eine Verlängerung der Belastungszeit bei konstantem Druck zu einer Zunahme des Druckzeitintegrals führt, ist es fraglich ob diese Annahme direkt auf die Pedobarographie übertragbar ist. Entscheidend ist hierbei die Frage nach der Konstanz des Drucks bei geschwindigkeitsbedingter Verlängerung der BKZ/Laufen. Inwieweit es bei Verlängerung der BKZ/Laufen nicht auch zu einer gleichzeitigen Reduktion des Drucks und somit weitestgehend unveränderten Werten des DZI kommt, bleibt offen.

Unabhängig von den diskutierten Einschränkungen, ist dennoch bei isolierter Betrachtung der vorliegenden Absolutwerte festzuhalten, dass eine Vergrößerung der ROM im OSG zu keiner Reduktion der Vorfußbelastung führt, sondern insbesondere im direkten Vergleich mit der KG sogar die Vorfußbelastung zu erhöhen scheint.

6.2.4 Dropjump Daten

Sprunghöhe

Die Werte der Sprunghöhe zeigen in beiden Gruppen weitestgehend konstante Werte. Entgegen der eingangs formulierten Annahme, dass eine Zunahme der ROM im OSG zu einer Zunahme der Sprunghöhe führt, können die Werte der IG dies bei einer geringen Abnahme der Sprunghöhe nicht bestätigen. Gleichzeitig scheint jedoch auch eine Reduktion der ROM im OSG wie sie bei der KG zu beobachten ist, die Sprunghöhe nicht entscheidend zu beeinflussen. Insofern deuten die Daten der vorliegenden Studie daraufhin, dass die Sprunghöhe unabhängig von Veränderungen der ROM im OSG zu sein scheint.

Entgegen den bereits diskutierten möglichen negativen Auswirkungen der PNF Methode auf die Maximalkraft und somit einer möglichen Reduktion der Sprunghöhe bleiben die Werte der IG konstant.

BKZ/Sprung

Die Werte der IG zeigen eine Abnahme der BKZ/Sprung während sich die Werte der KG auf einem konstanten Niveau halten. Möglicherweise kann die Kontraktion der Wadenmuskulatur bei größerer ROM im OSG schneller ablaufen, wodurch kürzere BKZ/Sprung bei reaktiven Sprüngen resultieren.

RI

Der Reaktivitätsindex kann als aussagekräftigster der drei untersuchten DJ Parameter herangezogen werden, da er die beiden zuvor diskutierten Parameter kombiniert und somit die beiden an den Sprung gestellten Forderungen eine maximale Sprunghöhe bei gleichzeitig minimaler Bodenkontaktzeit zu erzielen, am besten abbildet. Die RI- Werte der IG liegen prä- und postinterventionell auf einem weitestgehend konstanten Niveau und scheinen durch die verzeichnete Vergrößerung der ROM im OSG unbeeinflusst zu bleiben. Es ist jedoch zu diskutieren, ob eine deutliche Vergrößerung der ROM im OSG eigentlich zu einer Verbesserung von reaktiven Sprüngen führt, diese Verbesserung jedoch durch die negativen Auswirkungen der PNF Methode auf die Sprungkraft ausgeglichen werden und somit letztlich konstante Werte resultieren.

Die RI Werte der IG sind sowohl prä- als auch postinterventionell größer als die der KG. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den bereits erwähnten Altersunterschied der beiden Gruppenkollektive und die aufgrund dessen bereits besser entwickelte allgemeine Athletik auf IG Seite zurückzuführen.

6.2.5 Zusammenhang von Verletzungsanfälligkeit und ROM im OSG

Die formulierte Annahme, dass Spieler mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit distal des Kniegelenks eine geringere ROM im OSG aufweisen, kann in kausalem oder konsekutivem Sinn interpretiert werden. Die kausale Auslegung lässt sich vereinfacht ausdrücken mit: „Spieler verletzen sich vermehrt, weil sie eine geringere ROM im OSG aufweisen.“ Die geringere ROM wird als ursächlich für die vermehrt auftretenden Verletzungen angesehen. Der konsekutiven Auslegung liegt folgende These zugrunde: „Spieler verletzen sich und haben folglich eine geringere ROM im OSG.“ Als Erklärung für diesen Ansatz können durch den Heilungsprozess des Gewebes bedingte Vernarbungen, Verklebungen und Verkürzungen der Muskulatur angeführt werden.

Die Daten der vorliegenden Studie weisen jedoch in die entgegengesetzte Richtung. Spieler mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit weisen eine größere ROM im OSG auf als Spieler mit einer geringeren Verletzungsanfälligkeit. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung, liegt möglicherweise in einer vermehrten Fokussierung der betroffenen Spieler auf die Wiedererlangung der verletzungsbedingten Reduktion der ROM im OSG mittels Dehnung und Fortführung dieses Dehnverhaltens. Inwieweit diese These als Erklärung zutreffend ist, lässt sich nicht quantifizieren, da keinerlei Daten bezüglich des Dehnverhaltens der Probanden vor der Studie erfasst wurden.

6.2.6 Ausblick

Die Messwerte der ROM im OSG zeigen deutlich, dass durch eine achtwöchige PNF-Dehnintervention eine Vergrößerung der ROM erreichbar ist. Veränderungen der ROM scheinen sich jedoch nicht in der erwarteten Weise auf die Vorfußbelastung auszuwirken. Die Ergebnisse widersprechen dem allgemeinen Verständnis der Auswirkungen einer verlängerten Wadenmuskulatur auf die Vorfußbelastung. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie decken sich mit den Beobachtungen von Macklin et

al. (Macklin, Healy et al. 2012), dass eine Vergrößerung der ROM im OSG mit einer Zunahme der Vorfußbelastung einherzugehen scheint. Aufgrund der vorliegenden Daten bedarf es mehr Studien, die den Zusammenhang der ROM im OSG und dynamischen plantaren Belastungsprofilen untersuchen, um ein besseres Verständnis für mögliche Zusammenhänge bieten und gegebenenfalls bisher nicht verstandene Mechanismen aufdecken. Dies ist auch vor dem Hintergrund von operativen Verlängerungen, die einen deutlich größeren Eingriff in die Integrität des Patienten darstellen, als dies bei Dehnprogrammen der Falls ist, von entscheidender Bedeutung.

7. Zusammenfassung

7.1 Deutschsprachige Version

Eine verkürzte Wadenmuskulatur wird als Ursache für eine Vielzahl an Pathologien erachtet. Durch die Verkürzung der Muskelsehneneinheit des Musculus triceps surae und der Achillessehne kommt es zu einer eingeschränkten Dorsalextension des Fußes und das dadurch reduzierte Bewegungsausmaß im oberen Sprunggelenk führt zu Schmerzen und degenerativen Veränderungen im Bereich der Achillessehne (Achillodynie), am Achillessehnenansatz (Ansatztendinose, posteriorer Fersensporn, Plantarfasziitis) und dem Vorfuß (Metatarsalgie). Der pathoanatomische Zusammenhang einer verkürzten Wadenmuskulatur und der Metatarsalgie beruht auf einer chronisch erhöhten Vorfußbelastung. Die kausal orientierte Therapie der Beschwerden besteht in einer Verlängerung der Muskel-Sehnen-Strecke. Da sich bisher vorwiegend auf die Therapie von ausgeprägten Verkürzungen mit sichtbarer Spitzfußstellung konzentriert wurde, lag der therapeutische Fokus folglich auch vermehrt auf der operativen Verlängerung der Muskelsehneneinheit. Dadurch lässt sich auch das Übergewicht an Studien bezüglich operativer Ansätze und derer Ergebnisse erklären. Die konservative Herangehensweise einer Verlängerung der Wadenmuskulatur in Form von Dehnprogrammen und deren Auswirkungen auf die Vorfußbelastung ist bisher unzureichend untersucht worden.

Die vorliegende Studie untersucht die Auswirkungen eines gezielten achtwöchigen Wadendehnungsprogramms auf Veränderungen des Bewegungsausmaßes im oberen Sprunggelenk und der Vorfußbelastung. Eine Interventionsgruppe (n= 22) und eine Kontrollgruppe (n= 19) wurden zweimalig mit einem zeitlichen Abstand von acht Wochen untersucht. Während die Interventionsgruppe für acht Wochen einem gezielten Wadendehnungsprogramm folgt, führt die Kontrollgruppe die etablierten Dehnroutinen unverändert fort. Das prä- und postinterventionelle Bewegungsausmaß im oberen Sprunggelenk wird mit Hilfe des Silfverskiöld Tests quantifiziert. Der Test gibt zudem Rückschlüsse, ob es sich um eine isolierte Verkürzung des M. gastrocnemius oder eine komplexe Verkürzung des gesamten M. triceps surae handelt. Die Vorfußbelastung wird mittels dynamischer Pedobarographie, dem subjektiven Schmerzempfinden und der Vorfußbeschwellung gemessen. Ergänzt werden die Erkenntnisse, durch die im Zuge eines Sprungtests ermittelten funktionellen Parameter Sprunghöhe,

Bodenkontaktzeit und Reaktivitätsindex. Als Dehntechnik wurde das Propriozeptive Neuromuskuläre Faszikulatonsdehnen gewählt, da dieser Technik die größte Wirkung auf Veränderungen des Bewegungsausmaßes attestiert wird. Als Studienpopulation wurden Fußballspieler gewählt, da bei ihnen aufgrund der ungleichmäßigen funktionellen Beanspruchung der Beinmuskulatur in der Regel eine Verkürzung der Wadenmuskulatur, die mit einer krankheitswertig gesteigerten Vorfußbelastung einhergeht, vorliegt.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Dehnintervention zu einer Vergrößerung der ROM im OSG führt. In der Interventionsgruppe konnte eine durchschnittliche Zunahme des Bewegungsausmaßes im oberen Sprunggelenk von durchschnittlich $0,75^\circ$ auf der rechten Seite und 2° auf der linken Seite beobachtet werden. Dem gegenüber steht eine durchschnittliche Abnahme des Bewegungsausmaßes in der Kontrollgruppe von $2,5^\circ$ auf der rechten Seite und $1,5^\circ$ auf der linken Seite. Die eindeutige Vergrößerung der ROM führt jedoch nicht zu den erwarteten Veränderungen der Parameter, die die Vorfußbelastung quantifizieren. Auch auf die funktionellen Parameter des Sprungtests hat die Zunahme der Beweglichkeit im oberen Sprunggelenk keine eindeutig positiven Auswirkungen. Aufgrund der Messwerte der vorliegenden Untersuchung kann die These, dass eine Dehnintervention zu einer Reduktion der Vorfußbelastung führt, nicht bestätigt werden.

Die Ergebnisse widersprechen dem allgemeinen Verständnis der Auswirkungen einer verlängerten Wadenmuskulatur auf die Vorfußbelastung. Aufgrund der vorliegenden Daten bedarf es mehr Studien, die den Zusammenhang des Bewegungsausmaßes im oberen Sprunggelenk und dynamischen plantaren Belastungsprofilen untersuchen, um ein besseres Verständnis für mögliche Zusammenhänge zu bieten und gegebenenfalls bisher nicht verstandene Mechanismen aufzudecken.

7.2 Englischsprachige Version

Shortening of the calf muscle is considered to be the cause of a variety of pathologies. A shortened muscle tendon unit of the triceps surae muscle and Achilles tendon results in limited dorsiflexion of the foot and reduced range of motion of the ankle joint. Patients can develop pain and degenerative changes in the Achilles tendon (achillodynia), the Achilles tendon insertion (insertion tendinitis, posterior heel spur, plantar fasciitis) and the forefoot (metatarsalgia). The pathoanatomical connection between shortened calf muscles and metatarsalgia is based on a chronically increased forefoot load. The cause oriented therapy of such disorders consists in a lengthening of the muscle-tendon unit. So far the main focus has been the therapy of pronounced shortening with a visible equinus position of the foot. As a consequence the therapeutic approach is based mostly on surgical solutions.. This also explains the prevalence of studies regarding surgical approaches and their results. The conservative approach to calf muscle lengthening in the form of stretching programs and their effects on forefoot load has not been sufficiently investigated to date.

The present study examines the effects of a targeted eight-week calf stretching program on changes in the range of motion in the ankle joint and forefoot load. An intervention group (n= 22) and a control group (n= 19) were examined twice with an interval of eight weeks. While the intervention group followed a targeted calf stretching program for eight weeks, the control group continued the established stretching routines unchanged. The pre- and postinterventional range of motion in the ankle joint is quantified using the Silfverskiöld test. The test also provides conclusions as to whether it is an isolated shortening of the M. gastrocnemius or a complex shortening of the entire M. triceps surae. The forefoot load is measured by means of dynamic pedobarography, subjective pain sensation and forefoot callosity. The findings are supplemented by the functional parameters of jumping height, ground contact time and reactivity index determined in the course of a jump test. The proprioceptive neuromuscular fasciation stretching technique was chosen as the stretching technique with the greatest effect on changes in the range of motion. Soccer players were chosen as the study population, since their uneven functional loading of the leg muscles usually causes a shortening of the calf muscles, which is associated with a pathologically increased forefoot load.

The results of the study show that the stretching intervention leads to an increase in range of motion of the ankle joint. In the intervention group, an average increase in the range of motion in the ankle joint of 0.75° on the right side and 2° on the left side was observed. This is contrasted by an average decrease in range of motion in the control group of 2.5° on the right side and 1.5° on the left side. However, the clear increase in ROM does not lead to the expected changes in the parameters that quantify forefoot load. The increase in mobility in the ankle joint also has no clear positive effect on the functional parameters of the jump test. Based on the measured values of the present study, the thesis that a stretching intervention leads to a reduction of forefoot load cannot be confirmed.

The results contradict the general understanding of the effects of a lengthened calf muscle on forefoot load. Based on the available data, more studies are required to investigate the relationship between the range of motion in the upper talaric joint and dynamic plantar loading profiles in order to provide a better understanding of possible relationships and possibly uncover previously unknown mechanisms.

8. Literaturverzeichnis

Abbasian, A. (2013). "Isolated contracture and gastrocnemius recession." Foot Ankle Int **34**(2): 307-308.

Abdulmassih, S., et al. (2013). "Triceps surae contracture: implications for foot and ankle surgery." J Am Acad Orthop Surg **21**(7): 398-407.

Anderson, J. G., et al. (2014). "Gastrocnemius recession." Foot Ankle Clin **19**(4): 767-786.

Armstrong, D. G., et al. (1999). "Lengthening of the Achilles tendon in diabetic patients who are at high risk for ulceration of the foot." JBJS **81**(4): 535-538.

Aumüller, G., et al. (2007). "Duale Reihe Anatomie." Auflage Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S: 612-616.

Barouk, L. S. (2014). "The effect of gastrocnemius tightness on the pathogenesis of juvenile hallux valgus: a preliminary study." Foot Ankle Clin **19**(4): 807-822.

Barouk, P. (2014). "Introduction to gastrocnemius tightness." Foot Ankle Clin **19**(4): xv.

Barouk, P. and L. S. Barouk (2014). "Clinical diagnosis of gastrocnemius tightness." Foot Ankle Clin **19**(4): 659-667.

Barske, H. L., et al. (2012). "Current concepts review: isolated gastrocnemius contracture and gastrocnemius recession." Foot Ankle Int **33**(10): 915-921.

Barske, H. L., et al. (2013). "Authors' response: current concepts review: isolated gastrocnemius contracture and gastrocnemius recession." Foot Ankle Int **34**(2): 309.

Baumbach, S. F., et al. (2014). "The influence of knee position on ankle dorsiflexion-a biometric study." BMC musculoskeletal disorders **15**(1): 246.

Behm, D. G., et al. (2015). "Acute effects of muscle stretching on physical performance, range of motion, and injury incidence in healthy active individuals: a systematic review." Applied physiology, nutrition, and metabolism **41**(1): 1-11.

Bobbert, M. F. and P. A. Huijing (1987). "Drop jumping. II. The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping." Medicine and science in sports and exercise **19**(4): 339-346.

- Bowers, A. L. and M. D. Castro (2007). "The mechanics behind the image: foot and ankle pathology associated with gastrocnemius contracture." Semin Musculoskelet Radiol **11**(1): 83-90.
- Bus, S. A. and R. Waaijman (2013). "The value of reporting pressure–time integral data in addition to peak pressure data in studies on the diabetic foot: a systematic review." Clinical Biomechanics **28**(2): 117-121.
- Caldwell, B. P. and D. M. Peters (2009). "Seasonal variation in physiological fitness of a semiprofessional soccer team." The Journal of Strength & Conditioning Research **23**(5): 1370-1377.
- Cazeau, C. and Y. Stiglitz (2014). "Effects of gastrocnemius tightness on forefoot during gait." Foot Ankle Clin **19**(4): 649-657.
- Chantelau, E. (2009). Diabetische Füße und ihre Schuhversorgung, Walter de Gruyter.
- Chimera, N. J., et al. (2012). "The effect of isolated gastrocnemius contracture and gastrocnemius recession on lower extremity kinematics and kinetics during stance." Clin Biomech (Bristol, Avon) **27**(9): 917-923.
- Chimera, N. J., et al. (2010). "Function and strength following gastrocnemius recession for isolated gastrocnemius contracture." Foot Ankle Int **31**(5): 377-384.
- de Castro, M. P., et al. (2014). "In-shoe plantar pressures and ground reaction forces during overweight adults' overground walking." Research quarterly for Exercise and Sport **85**(2): 188-197.
- DiGiovanni, C. W., et al. (2002). "Isolated gastrocnemius tightness." J Bone Joint Surg Am **84-A**(6): 962-970.
- Ekstrand, J., et al. (1982). "Lower extremity goniometric measurements: a study to determine their reliability." Arch Phys Med Rehabil **63**(4): 171-175.
- Ekstrand, J., et al. (1982). "Lowert extremity goniometric measurements: a study to determine their reliability." Arch Phys Med Rehabil **63**(4): 171-175.
- Elftman, H. (1934). "A cinematic study of the distribution of pressure in the human foot." The Anatomical Record **59**(4): 481-491.
- Elveru, R. A., et al. (1988). "Goniometric reliability in a clinical setting. Subtalar and ankle joint measurements." Phys Ther **68**(5): 672-677.
- Engelhardt, P. (2018). Orthopädische Fußchirurgie, Springer.

- Engelsberger, S. (2017). "Piezokeramiken als kapazitive Belastungssensoren: Zuverlässigkeit, Anwendung und Einsatz."
- Espinosa, N., et al. (2010). "Metatarsalgia." J Am Acad Orthop Surg **18**(8): 474-485.
- Etnyre, B. R. and L. D. Abraham (1986). "Gains in range of ankle dorsiflexion using three popular stretching techniques." Am J Phys Med **65**(4): 189-196.
- Ferber, R., et al. (2002). "Effect of PNF stretch techniques on knee flexor muscle EMG activity in older adults." J Electromyogr Kinesiol **12**(5): 391-397.
- Fernando, M. E., et al. (2018). The Importance of Foot Pressure in Diabetes. Handbook of Human Motion. Cham, Springer International Publishing: 759-787.
- Funk, D. C., et al. (2003). "Impact of prior exercise on hamstring flexibility: a comparison of proprioceptive neuromuscular facilitation and static stretching." J Strength Cond Res **17**(3): 489-492.
- Gabel, J. (2015). "Funktionsanalyse des Fußes." Trauma und Berufskrankheit **17**(1): 4-9.
- Gajdosik, R. L., et al. (2005). "Effects of an eight-week stretching program on the passive-elastic properties and function of the calf muscles of older women." Clin Biomech (Bristol, Avon) **20**(9): 973-983.
- Gollhofer, A., et al. (2009). Biomechanik der Skelettmuskulatur.
- Grady, J. F. and A. Saxena (1991). "Effects of stretching the gastrocnemius muscle." J Foot Surg **30**(5): 465-469.
- Greenhagen, R. M., et al. (2012). "Gastrocnemius recession or tendo-achilles lengthening for equinus deformity in the diabetic foot?" Clinics in podiatric medicine and surgery **29**(3): 413-424.
- Güllich, A. and D. Schmidtbleicher (1999). "Struktur der Kraftfähigkeiten und ihrer Trainingsmethoden." Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin **50**(7/8): 223-234.
- Hindle, K. B., et al. (2012). "Proprioceptive Neuromuscular Facilitation (PNF): Its Mechanisms and Effects on Range of Motion and Muscular Function." J Hum Kinet **31**: 105-113.
- Hohmann, A., et al. (2002). "Einführung in die Trainingswissenschaft."

Hong, Y., et al. (2012). "Comparison of plantar loads during treadmill and overground running." J Sci Med Sport **15**(6): 554-560.

Hotfiel, T., et al. (2017). "Plantar pressures increase with raising body weight: A standardised approach with paired sample using neutral shoes." Journal of back and musculoskeletal rehabilitation **30**(3): 583-589.

International, F. D. (2017).

Johnson, E., et al. (2007). "Effect of a static calf muscle-tendon unit stretching program on ankle dorsiflexion range of motion of older women." J Geriatr Phys Ther **30**(2): 49-52.

Klee, A. (2003). "Methoden und Wirkungen des Dehnungstrainings." Hofmann, Schorndorf.

Klee, A. and K. Wiemann (2004). Biologische Grundlagen zur Wirkung der Muskeldehnung.

Komi, P. V. (2000). "Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle." J Biomech **33**(10): 1197-1206.

Lindel, K. (2006). Muskeldehnung, Springer.

Macklin, K., et al. (2012). "The effect of calf muscle stretching exercises on ankle joint dorsiflexion and dynamic foot pressures, force and related temporal parameters." Foot (Edinb) **22**(1): 10-17.

Magid, A. and D. J. Law (1985). "Myofibrils bear most of the resting tension in frog skeletal muscle." Science **230**(4731): 1280-1282.

Magnusson, S. P., et al. (1996). "Mechanical and physical responses to stretching with and without preisometric contraction in human skeletal muscle." Arch Phys Med Rehabil **77**(4): 373-378.

Mahieu, N. N., et al. (2009). "Effect of proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on the plantar flexor muscle-tendon tissue properties." Scand J Med Sci Sports **19**(4): 553-560.

Martin, R. L. and T. G. McPoil (2005). "Reliability of ankle goniometric measurements: a literature review." Journal of the American Podiatric Medical Association **95**(6): 564-572.

Martínez-Jiménez, E. M., et al. (2019). "Acute Effects of Intermittent Versus Continuous Bilateral Ankle Plantar Flexor Static Stretching on Postural Sway and Plantar Pressures: A Randomized Clinical Trial." J Clin Med **8**(1).

Maruyama, K., et al. (1977). "Connectin, an elastic protein of muscle. Characterization and Function." J Biochem **82**(2): 317-337.

Maskill, J. D., et al. (2010). "Gastrocnemius recession to treat isolated foot pain." Foot Ankle Int **31**(1): 19-23.

Mehlhorn, A. T., et al. (2017). "Die operative Therapie des Vorfußüberlastungssyndroms als Folge einer Kontraktur des M. gastrocnemius." Fuß & Sprunggelenk **15**(4): 244-252.

Mikolajec, K., et al. (2012). "Effects of stretching and strength exercises on speed and power abilities in male basketball players." Isokinetics and Exercise Science **20**(1): 61-69.

Miner-Williams, W. (2017). "The accuracy and reliability of plantar pressure measurements for the early diagnosis of foot deformities in patients suffering from rheumatoid arthritis." Diversity & Equality in Health and Care **14**(4): 193-202.

Morales-Muñoz, P., et al. (2016). "Gastrocnemius Proximal Release in the Treatment of Mechanical Metatarsalgia." Foot Ankle Int.

Nakamura, M., et al. (2016). "Changes in Passive Properties of the Gastrocnemius Muscle-Tendon Unit During a 4-Week Routine Static Stretching Program." J Sport Rehabil.

Nishimoto, G. S., et al. (2003). "Lengthening the Achilles tendon for the treatment of diabetic plantar forefoot ulceration." Surgical Clinics **83**(3): 707-726.

OpenStax (2016). Retrieved 15.01.2019, from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30015037>.

Patel, A. and B. DiGiovanni (2011). "Association between plantar fasciitis and isolated contracture of the gastrocnemius." Foot Ankle Int **32**(1): 5-8.

Perry, J. (2003). Ganganalyse: Norm und Pathologie des Gehens, Elsevier, Urban&FischerVerlag.

Petty, J. F. (1998). "The relationship between maximum ankle dorsiflexion range of motion and maximal posterior horizontal excursion in standing."

Phisitkul, P., et al. (2014). "Endoscopic Gastrocnemius Recession for the Treatment of Isolated Gastrocnemius Contracture: A Prospective Study on 320 Consecutive Patients." Foot Ankle Int **35**(8): 747-756.

Radford, J. A., et al. (2006). "Does stretching increase ankle dorsiflexion range of motion? A systematic review." Br J Sports Med **40**(10): 870-875; discussion 875.

Ramirez-Campillo, R., et al. (2019). "Effects of Combined Surfaces vs. Single-Surface Plyometric Training on Soccer Players' Physical Fitness." J Strength Cond Res.

Richfield, D. (2014). "Medical Gallery of David Richfield." Retrieved 15.01.2019, from https://en.wikiversity.org/wiki/WikiJournal_of_Medicine/Medical_gallery_of_David_Richfield_2014.

Richter, A. (2011). Aspekte der Sprungkraft und Sprungkraftdiagnostik unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung im Kindes-und Jugendalter.

Rong, K., et al. (2016). "Comparison of the efficacy of three isolated gastrocnemius recession procedures in a cadaveric model of gastrocnemius tightness." Int Orthop **40**(2): 417-423.

Sady, S. P., et al. (1982). "Flexibility training: ballistic, static or proprioceptive neuromuscular facilitation?" Arch Phys Med Rehabil **63**(6): 261-263.

Samaei, A., et al. (2012). "Effects of genu varum deformity on postural stability." International journal of sports medicine **33**(06): 469-473.

Scan, R. (2019). from https://rsscan.com/footscan/high-end/#tab_products.

Segal, A., et al. (2004). "The effect of walking speed on peak plantar pressure." Foot & Ankle International **25**(12): 926-933.

Sgarlato, T. E., et al. (1975). "Tendo achillis lengthening and its effect on foot disorders." Journal of the American Podiatric Medical Association **65**(9): 849-871.

Silfverskiöld, N. (1924). "Reduction of the uncrossed two-joints muscles of the leg to one-joint muscles in spastic conditions." Acta Chir Scandinav **56**: 315-330.

Singh, D. (2013). "Nils Silfverskiöld (1888-1957) and gastrocnemius contracture." Foot Ankle Surg **19**(2): 135-138.

Spernoga, S. G., et al. (2001). "Duration of maintained hamstring flexibility after a one-time, modified hold-relax stretching protocol." Journal of athletic training **36**(1): 44.

- Symeonidis, P. (2014). "The Silfverskiöld Test." Foot Ankle Int **35**(8): 838.
- Tylkowski, C. M., et al. (2009). "Outcomes of gastrocnemius-soleus complex lengthening for isolated equinus contracture in children with cerebral palsy." J Pediatr Orthop **29**(7): 771-778.
- van Gils, C. C., et al. (1996). "Torsion of the human Achilles tendon." J Foot Ankle Surg **35**(1): 41-48.
- Vulpus, O. and A. Stoffel (1913). Tenotomie der end schnen der mm. gastrocnemius el soleus mittels mittels rutschenlassens nach vulpius. Orthopadische operationslehre, Nabu Press, Stuttgart (Germany): 29-31.
- Wallin, D., et al. (1985). "Improvement of muscle flexibility. A comparison between two techniques." Am J Sports Med **13**(4): 263-268.
- Walsh, M., et al. (2004). "The effect of drop jump starting height and contact time on power, work performed, and moment of force." The Journal of Strength & Conditioning Research **18**(3): 561-566.
- Wank, V. and H. Heger (2009). "Sprünge." Handbuch Sportbiomechanik. Hofmann: Schorndorf.
- Weppler, C. H. and S. P. Magnusson (2010). "Increasing muscle extensibility: a matter of increasing length or modifying sensation?" Phys Ther **90**(3): 438-449.
- Westhoff, B., et al. (2011). "Spastischer SpitzfußSpastic equinus foot." Der Orthopäde **40**(7): 637-648.
- Wiemann, K., et al. (1999). "Filamentäre Quellen der Muskel-Ruhespannung und die Behandlung muskulärer Dysbalancen (Fibrillar sources of the muscle resting tension and the therapy of muscular imbalances)." Zeitschr f Physiotherapeuten **4**: 628-640.
- Wiemann, P. D. K. (Zugriff 01/19). Muskeldehnung: <http://www.biowiss-sport.de/forschungsprojekte-arbeiten/muskeldehnung/>.
- Witte, K. (2018). Motorik des Gehens. Ausgewählte Themen der Sportmotorik für das weiterführende Studium (Band 2), Springer: 17-36.
- Witvrouw, E., et al. (2003). "Muscle flexibility as a risk factor for developing muscle injuries in male professional soccer players: a prospective study." The American journal of sports medicine **31**(1): 41-46.

Wren, T. A., et al. (2004). "Gastrocnemius and soleus lengths in cerebral palsy equinus gait--differences between children with and without static contracture and effects of gastrocnemius recession." J Biomech **37**(9): 1321-1327.

You, J. Y., et al. (2009). "Gastrocnemius tightness on joint angle and work of lower extremity during gait." Clin Biomech (Bristol, Avon) **24**(9): 744-750.

Youdas, J. W., et al. (2003). "The effect of static stretching of the calf muscle-tendon unit on active ankle dorsiflexion range of motion." J Orthop Sports Phys Ther **33**(7): 408-417.

Zöllner, A. M., et al. (2015). "On high heels and short muscles: a multiscale model for sarcomere loss in the gastrocnemius muscle." J Theor Biol **365**: 301-310.

9. Anhänge

9.1 Aufklärungsbogen, Einverständniserklärung und Anamnesebogen

Studie: „Effekte eines 8-wöchigen propriozeptiven neuromuskulären Faszikulationsdehnprogramms auf die Länge der Wadenmuskulatur und die Vorfußbelastung bei semiprofessionellen Fußballern“

Sehr geehrter Proband, wir möchten ihnen nachfolgend den Ablauf und die Hintergründe der Studie erklären und sie fragen, ob sie sich bereit erklären an der Studie teilzunehmen. Ihre Teilnahme an der Studie ist freiwillig und ein Abbruch ist jederzeit ohne Begründung möglich, ohne dass Ihnen daraus Nachteile entstehen. Ihre Daten werden nur verwendet falls sie schriftlich einwilligen.

Warum wird die Studie durchgeführt?

Der Zweck dieser Studie ist es die Auswirkung eines 8-wöchigen Dehnprogramms auf den Dehnungszustand der Wadenmuskulatur zu untersuchen. Des Weiteren werden Veränderungen von Belastungsverteilung der Fußsohle und Veränderungen der Sprungkraft untersucht.

Mit den Ergebnissen möchten wir neue Erkenntnisse über Zusammenhänge von Dehnung, Schmerz und Leistung gewinnen.

Wie ist der Ablauf der Studie und was gilt es zu beachten?

Zu Beginn der Studie wird in einem Fragebogen ihre Krankheitsvorgeschichte erfasst und eine Eingangsuntersuchung durchgeführt. Die allgemeine Eingangsuntersuchung erfasst mögliche Beinlängendifferenzen, Beinachse, Fehlstellungen der Füße, Beschuielung und mögliche Zehendeformitäten. Im Anschluss wird der Dehnungszustand ihrer Wadenmuskulatur mit Hilfe eines Winkelmessers festgehalten.

Für die Messung des Belastungsprofils ihrer Fußsohle werden sie zunächst für eine statische Messung gebeten sich mit einem Fuß auf die Messplatte zu stellen. In einer

zweiten Messung werden sie über die Messplatte laufen um das dynamische Belastungsprofil zu erfassen.

Die letzte Untersuchung misst ihre Bodenkontaktzeit und Sprungkraft.

In den folgenden 8 Wochen werden sie ein Dehnprogramm durchführen. Dieses Dehnprogramm werden sie in ihr normales Dehnprogramm an 5 Tagen pro Woche vor dem Training und Spielen integrieren. Die Dauer einer Dehneinheit beläuft sich auf ca. 5min. Hierbei ist es wichtig das Dehnprogramm konsequent durchzuführen, da sonst die Erkenntnisse bzw. die Auswirkungen verfälscht werden.

Welche Risiken gibt es?

Es sind keine Risiken von Dehnprogrammen bekannt, wenn sie die Dehnung wie angewiesen und im schmerzfreien Bereich durchführen.

Was geschieht mit meinen Daten?

Während der Studie werden medizinische Befunde persönliche Informationen von Ihnen erhoben und elektronisch gespeichert. Für die weitere Verarbeitung werden ihre persönlichen Daten unkenntlich gemacht.

Erhobene Daten werden eventuell für Vorträge und wissenschaftliche Veröffentlichungen verwendet.

Die Daten sind gegen unbefugten Zugriff gesichert.

Einwilligungserklärung

Name des Probanden:

Geb. am:

Teilnehmer-Nr:

Ich bin in einem Gespräch durch den Doktoranden Florentin Hohnloser ausführlich und verständlich über die Studie aufgeklärt worden. Ich habe den Text der Probandeninformation gelesen und verstanden. Ich hatte ausreichend Zeit mich zu entscheiden. Mir ist bekannt, dass ich jederzeit und ohne Angabe von Gründen meine Einwilligung zur Teilnahme zurückziehen kann und dadurch keine Nachteile für mich von Seiten des Vereins entstehen.

Datenschutz:

Mir ist bekannt, dass ich jederzeit und ohne Angabe von Gründen meine Einwilligung zur Teilnahme zurückziehen kann und dadurch keine Nachteile für mich entstehen. Des Weiteren ist mir bekannt, dass bei der Studie personenbezogenen Daten und medizinischen Befunde über mich erhoben, gespeichert und ausgewertet werden sollen. Die Verwendung der Angaben über meine Gesundheit erfolgt nach gesetzlichen Bestimmungen und setzt vor der Teilnahme an der Studie folgende freiwillig abgegebene Einwilligungserklärung voraus, das heißt: ohne die nachfolgende Einwilligung kann ich nicht an der Studie teilnehmen.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass im Rahmen der dieser Studie personenbezogene Daten und Aufnahmen, insbesondere Angaben über meine Gesundheit, über mich erhoben und in Papierform sowie auf elektronischen Datenträgern aufgezeichnet werden. Soweit erforderlich dürfen die Studien pseudonymisiert (verschlüsselt) weitergegeben werden.

Ich bin darüber aufgeklärt worden, dass ich jederzeit die Teilnahme an der Studie beenden kann und dadurch keine Nachteile für mich entstehen. Beim Widerruf meiner Einwilligung, an der Studie teilzunehmen habe ich das Recht die Löschung aller meiner bis dahin gespeicherten personenbezogenen Daten zu verlangen.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Daten nach Beendigung oder Abbruch der Studie mindestens zehn Jahre aufbewahrt werden. Danach werden meine personenbezogenen Daten gelöscht, soweit nicht gesetzliche, satzungsmäßige oder vertragliche Aufbewahrungsfristen entgegenstehen.

Ich erkläre mich bereit, an der oben genannten Studie freiwillig teilzunehmen.

Ein Exemplar der Patienten-Information habe ich erhalten.

Name des Probanden in Druckbuchstaben:

Datum:

.....

Unterschrift des Probanden:

.....

Anamnesebogen

Name/Nummer:

Alter:

Gewicht:

Größe:

Spieldauer:

Schmerzen im Bereich des Vorfußes (0= keine Schmerzen, 10= schlimmste Schmerzen)

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Verletzungsvorgeschichte (nur Verletzungen unterhalb des Knies):

Art der Verletzung (nur Verletzungen unterhalb des Kniegelenks)	Zeitpunkt	Dauer des Ausfalls für Spielbetrieb

Ort, Datum, Unterschrift:

9.2 Ethikvotum



Philipps-Universität - 35032 Marburg

Herrn
PD Dr. med. Christian-Dominik Peterlein
Universitätsklinikum Gießen u. Marburg GmbH
Standort Marburg
Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie
Baldingerstraße
35033 Marburg

Fachbereich Medizin

Dekanat/Ethikkommission

Prof. Dr. med. Gerd Richter (Vors.)

Tel.: 06421 586 6487
Fax: 06421 586 6585
Sek.: D. Raiss/S. Hausmann
E-Mail: ethikkom@staff.uni-marburg.de
Anschrift: Baldingerstrasse/Postfach 2360
35032 Marburg
Web: www.med.uni-marburg.de/ethikkomm
Az.: Studie 154/16

Marburg, den 11.05.2017

N/ PD Dr. med. Renée Andrea Fuhrmann, Klinik für Fuß- und Sprunggelenkchirurgie Bad
Neustadt a. d. Saale, Salzburger Leite 1, 97616 Bad Neustadt a. d. Saale

Studie : „Effekte eines 8-wöchigen PNF Dehnprogramms auf die Länge der Wadenmuskulatur und die Vorfußbelastung bei semiprofessionellen Fußballern“.

Eingereichte Unterlagen:

1. Anschreiben vom 08.11.2016
2. Ethikantrag (revidiert, Eingang 20.04.2017)
3. Aufklärungsbogen und Einverständniserklärung Version 2 vom 26.04.2017
4. Power-Berechnung für die Dehn-Studie von Herrn PD Dr. Peterlein et. al vom 13.09.2016
5. Anamnesebogen 1

Sehr geehrter Herr Dr. Peterlein,

vielen Dank für die modifizierten bzw. korrigierten Unterlagen entsprechend unserem Schreiben vom 29.11.2016. Nunmehr sind alle Auflagen erfüllt, so dass keine berufsethischen und berufsrechtlichen Bedenken gegen die Durchführung der Studie bestehen.

Damit schließt die Ethikkommission des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg ihr Gutachten mit einem

positiven Ethikkommissionsvotum

ab.

Entsprechend der ausschließlichen beratenden Funktion der Ethik-Kommission betrifft dieses Votum nur die ethische Beurteilung der Konzeption, der vorgesehenen Methoden, der Durchführung und Überwachung des betreffenden Projektes sowie der beabsichtigten Patientenaufklärung. Die ärztliche und juristische Verantwortung verbleibt jedoch uneingeschränkt beim Projektleiter und seinen Mitarbeitern.

Bitte geben Sie uns jede Änderung in der Protokolldurchführung bekannt. Es muss dann geklärt werden, ob das Votum der Ethik-Kommission noch Gültigkeit hat. Bitte berücksichtigen Sie, dass nachgereichte Unterlagen mit einer Versionsnummer und einem Versionsdatum zu versehen sind (Fußzeile), um deren Identifizierbarkeit bei der Votierung zu ermöglichen. Bitte berücksichtigen Sie

Sekretariat : Frau Raiss Montag – Donnerstag 8.00 – 12.00 Uhr, Freitag 8.00 – 11.00 Uhr

Frau Hausmann Montag – Freitag 12.00 – 14.00 Uhr

Kommissionsmitglieder: □ Prof. Dr. Jens Puschke □ Prof. Dr. Dr. H. Brettel, □ Prof. Dr. med. J.-C. Krieg, □ Prof. Dr. med. Czubyko, □ Prof. Dr. med. G. Richter (Vorsitzender), □ PD Dr. Carola Selfart, □ Prof. Dr. med. Uwe Wagner (stellvertretender Vorsitzender), □ Prof. Dr. med. R. Maier, □ Prof. Dr. med. N. Donner-Banzhoff, □ PD Dr. Hans-Helge Müller □ Dr. rer. nat. Nina Timmesfeld, □ Prof. Dr. med. A. Neubauer, □ PD Dr. B. Tackenberg, □ PD Dr. Barbara Fritz □ Bettina Nieth, □ Dr. Thomas

- 2 -

ferner, dass eine Bearbeitung nur möglich ist, wenn sämtliche Unterlagen als einzelne Dokumente, auch in elektronischer Form (etwa auf CD) eingereicht werden.

Über alle schwerwiegenden oder unerwarteten unerwünschten Ereignisse, die während der Studie auftreten und die Sicherheit der Studienteilnehmer oder die Durchführung der Studie beeinträchtigen könnten, muss der Vorsitzende der Ethik-Kommission unterrichtet werden.

Die Ethik-Kommission des Fachbereichs Humanmedizin der Philipps-Universität Marburg arbeitet gemäß den nationalen gesetzlichen Bestimmungen und den ICH-GCP-Richtlinien.

Außerdem benötigt die Ethik-Kommission einen Bericht nach Abschluss der Studie.

Mit freundlichen kollegialen Grüßen
für die Ethik-Kommission des
Fachbereichs Humanmedizin
der Philipps-Universität Marburg

Prof. Dr. med. G. Richter
(Vorsitzender Ethikkommission)

9.3 Verzeichnis der akademischen Lehrer/innen

Meine akademischen Lehrenden in Marburg waren:

Alter, Bartsch, Bauer, Baum, Becker A., Becker K., Best, Bette, Bien, Brehm, Cetin, Czubayko, Daut, Decher, Del Rey, Dettmeyer, Dodel, Donner-Banzhoff, Fendrich, Feuser, Fisseni, Fuhrmann, Fritz, Görg, Geks, Gress, Grgic, Grundmann, Haas, Halaszovich, Hertl, Hildebrandt, Hoch, Hoyer, Jacobsohn, Jerrentrupp, Josephs, Kann, Kinscherf, Kircher, Knorrenschild, Koehler, König, Kortus-Goetze, Leonhardt, Lill, Lohoff, Lüsebrink, Mahnken, Maier, Maier-Giebing, Meißner, Milani, Mittag, Moll, Mueller, Mutters, Neubauer, Neumüller, Oberwinkler, Oertel, Oliver, Opitz, Pagenstecher, Pankuweit, Patrascan, Peterlein, Pfestroff, Pfützner, Plant, Preisig-Müller, Reese, Renz, Richter, Rinne, Rost, Ruchholtz, Sahmland, Sohlbach, Schäfer J., Schäfer M., Schiefer, Schoner, Schratt, Schu, Schulze, Schütz, Schwabe, Seifart, Sekundo, Sevinc, Stahl, Steiniger, Stief, Strik, Tackenberg, Teymoortash, Thieme, Thum, Timmesfeld, Vogelmeier, Vogt, Vorwerk, Wagner, Weihe, Westermann, Wiesmann, Worzfeld, Wrocklage, Wulf, Zavorotny

9.4 Danksagung

Zunächst einmal möchte ich meiner Doktormutter Frau PD Dr. Fuhrmann und PD Dr. Peterlein für die Betreuung und die konstruktive Kritik danken. Des Weiteren möchte ich PD Dr. Sitter vom Institut für medizinische Biometrie und Epidemiologie für die Hilfe bezüglich der statistischen Auswertung danken. Ein besonderer Dank gilt auch der Firma Diers für die Bereitstellung der Messplatte und insbesondere Frau Amira Basic für ihre endlose Geduld bei meinen wiederholten Sonderwünschen von pedobarographischen Messparametern. Ich möchte weiterhin den Verantwortlichen und Spielern des FC Astoria Walldorf für ihre Teilnahme an dieser Studie danken. Abschließend möchte ich mich bei meiner Freundin Julia Janßen für ihr geduldiges Zuhören und die stetige Unterstützung bedanken.